الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة الحاج لخضر باتنة
كلية العلوم الدقيقة
قسم الفيزياء

مذكرة

نيل شهادة الماجستير

شعبة : الفيزياء الإشعاعية

تأثير الحقل المغناطيسي الأرضي في الأشعة الكونية

من انجاز الطالب

فيصلي محمد

رئيس اللجنة	الأستاذ بوالجدري عبد الحميد	أستاذ التعليم العالي	جامعة باتنة
المشرف	الأستاذ عطاء الله رضا	أستاذ التعليم العالي	جامعة عنابة
ممتحن	الأستاذ ميموني جمال	أستاذ التعليم العالي	جامعة قسنطينة
ممتحن	الأستاذ صيد عبد العزيز	أستاذ محاضر	جامعة باتنة

شـكــر و تقديـــــــــر

أتوجه بجزيل الشكر و العرفان بالجميل لكل من :

الأستاذ رضـا عطاء الله لتقبلـه الإشراف علينـا و توجيـهنا أثنـاء قيامنـا بـهذا العمـل .

الأستـاذ بوالجـدري عبـد الحميـد لتقبـلـه تـرأس لجنـــة المنـاقشــــة .

الأستاذ جمال ميموني و الأستاذ صيد عبد العزيز على قبـولهما الاشتـراك في لجنـة المناقشـة .

و هـذا رغـم الانشغـالات الكثيــرة للجميـــــع .

كما أتوجه بالشكر لكل الطاقم الذي اطر دفعة الماجستيــر في الفيزيـاء للسنة الدراسيـة 2006-2007

على المهودات التي بذلها الجميع رغم الالتزامات الكثيرة التي كانت تقييدهم و اذكر على وجه الخصوص

الأستاذ بوالجدري عبد الحميد الذي كان وراء تشكيل هذه الدفعـة و تفانيه في الأداء و الروح المهنيـة

و الأستاذ بلول دراجي على ما تلقيناه منه من مساعدة .

كما أتوجه بالشكر أيضا لكل من الأستاذ بوجعدار جمـال و الأستـاذ طاجين عبد العزيز على المساعدة

التي تلقيناها من كليـهما . و لكـل من ساعـدنا من قريب أو من بعيـد في انجـاز هـذا العمـل .

فيصلي محمد بن صالح .

إهـــــــداء

إلى الوالديـــــن العزيزيـــــن

وكل الأساتـــــــذة

الفهرس

الموضوع
الصفحة

الفصـل الأول
عمـوميـات عن الأشعـة الكونيـة

الفصـل الثـ ـاني

ديناميـكا الجسيـمات المشحونـة في الحقـول المغناطيسيـة

الفصـل الثـالث

المحـ ـ ـ ـاكـ ـ ـ ـ ـاة

مقدمــة

الأشعة الكونيــة هي جسيمات أغلبيتها العظمى مشحونة ترد إلى الأرض من مختلف مناحي الفضاء بطيف طاقوي عريض جــدا يصل إلى غايــة 10^{12} GeV **، تتكون بشكل أســاسي من البروتونات بنسبة** 89 % **و انوية الهليوم بنسبة** 10% **و بنسب ضئيلة جدا انوية باقي عناصر الجدول الدوري إضافة إلى فوتونات** γ **و** X **و كذلك بعض الجسيمات الأخرى كالالكترونات و البوزيترونات . اكتشفت الأشعــة الكونيــة سنة** 1912 **من قبل الفيزيائي هاس** Hess **، أما اسم "الأشعة الكونية " فقد أطلقه عليها الفيزيائي ميليكان سنــة** 1925 **وذلك بعــدما تأكــد من أن مصدرها خارجي.**

عنــدما تقترب الأشعة الكونية من الأرض ، أي عندما تصبح على مسافة قدرها حوالي 10 **أضعاف نصف قطر الأرض تصبــح عمليــا تحت تأثيــر الحقل المغناطيسي الأرضي . يقوم الحقــل المغناطيسي الأرضي بمنع الأشعة الكونية وخصوصا الجسيــمات ضعيفة الطاقة (الأقل من** 10 GeV**) من بلــوغ سطح الأرض حيث يعيــدها إلى مناطق أخرى من الفضاء ، أما الجسيمات عالية الطاقة فان بلوغها سطح الأرض يتوقف على موقع و اتجــاه دخــولها الأرض ، تسمى هاته الظاهرة بالقطع المغناطيسي** (geomagnetic cut-off) **.**

نتيــجة للقطع المغناطيسي يتناقص تدفق الأشعة الكونية التي تبلــغ سطح الأرض مقارنة بالتدفق الأصلي و يتوقف مقدار التناقص في التدفق بشكل أساسي على الموقع بالنسبة لخط الاستواء ، حيث يكون التناقص في التدفق أعظميا في المناطق الاستوائيــة و يقل كلما اتجهنا نحو القطبين أين يكون التناقص معدوما تقريبا.

تمت دراسة حركة الجسيمات المشحونة في الحقــل المغناطيسي الأرضي أول مرة سنة 1911 **(قبل اكتشاف الأشعة الكونية) من قبل الفيزيائي ستورمر**Stormer **، واستمرت حتى سنــة** 1935**، اعتبر ستورمر في تلك الدراســة أن حقل الأرض المغناطيسي هو حقل ثنائي قطب مغناطيسي وبحله لمعادلات الحركــة (معادلــة لورنتز) اثبت انه هناك مناطق مسموحة حركيا و أخرى محضورة لا يمكن للجسيمات المشحونة أن تتحرك فيها كما اثبت أيضا انه هناك حــد أدنى من الطاقة يجب أن تمتلكه الجسيمات المشحونة كي تستطيع بلوغ سطح الأرض (أو أي نقــطة من الحقل المغناطيسي) ، تسمى هاته القيــمة قيمة القطع المغناطيسي . و قد حدد ستورمر شكل المناطق الحركية كما حدد أيضا قيم القطع المغناطيسي .**

لم يكن عمـل ستورمر كافيا لشرح تأثير الحقل المغناطيسي الأرضي على الأشعة الكونيـة لسببين ، فمن جـهة كانت تعوزه الدقـة لان الحقل المغناطيسي الأرضي ليس حقلا بسيطا وأن نمـوذج ثنائي القطب المغناطيسي يستحق بعض التصحيحات كما أن الطريقة التحليليـة لا يمكنها أن تظهر تأثير ظاهرة القطع المغناطيسي على تدفق الأشعة الكونية .

في هذا العمل سنحـاول شرح تأثيـر الحقـل المغناطيسي الأرضي على الأشعة الكونية بطريقة إحصائية (تحليل كمي) حيث سنقوم بحساب مقدار تغير تدفق الأشعة الكونية نتيجة لعملية القطع المغناطيسي و ذلك باستخـدام المحاكـاة ، وقد تمت المحاكـاة بواسطة برنامج مكتوب بلغة سي++ (c++) أما العمليـات الحسابيـة فقد تمت باستخـدام طريقـة مونت-كارلو Monte-carlo وطريقة رونج-كيتا runge-kutta العددية ،كما استخدمنا النموذج العددي المسمى IGRF10 (international geomagnetic reference of Field-) لوصف الحقـل المغناطيسي الأرضي بدلا من نموذج ثنائي القطب المغناطيسي.

بعد ذلك ومن اجل تأكيـد مدى قوة هاته الطريـقة ، تمت مقارنة النتائج المتحصـل عليها بتلك التي تم الحصول عليها من خلال التجربـة AMS-01 . وهي التجربـة التي أجريت سنـة 1998 وكانت تهدف إلى كشف مكونـات الأشعـة الكونيـة وكذا قيـاس التدفـق التفـاضلي لكل نوع من مكوناتها .

قسم هذا العمل إلى ثلاثة فصول ، حيث خصص الفصل الأول للتعريف بالأشعة الكونية بشكل عمومي من خـلال عرض ما هو معروف عنها بشكل كامـل وما هو غير معروف لحد الآن . أما الفصل الثـاني فقد خصص لدراسة حركة الجسيمات المشحونة في الحقول المغناطيسية وفيه تم عرض الخصائـص العـامة للحركة في مثل هاته الحقول وكذا عرض لنظرية ستورمر التي تشرح حركة الجسيمات المشحونة في الحقل المغناطيسي الأرضي عند اعتباره حقل ثنائي قطب مغناطيسي ، إضافة إلى عرض لاستخدام الطرق العددية لحل معادلات الحركة (معادلة لورنتز) و رسم المسارات . أما الفصل الثالث و الأخير فقد خصص لشرح ظاهرة القطع المغناطيسي التي تتعرض لها الأشعة الكونية أثناء اقترابها من الأرض باستخدام المحاكاة . و فيه نجـد وصف للحقل المغناطيسي الأرضي الحقيقي وكذلك وصف للتجربة AMS و نتائجها كما نجد أيضا شرح للعمليات الحسابية المستخدمة في عملية محاكاة انتشار الأشعة الكونية في الحقل المغناطيسي الأرضي و في الأخير عرض للنتائج المتحصل عليها مع الشرح و المقارنة بنتائج التجربة AMS .

الفصـل الأول

عمـوميـ ـات
عن الأشعـ ـ ـة الكونيـ ـ ـة

يتعرض هذا الفصل بشكل عام لموضوع الأشعة الكونية ، وهو مقسم إلى تسعـة بنود ، البنـد الأول هو تعريف للأشعة الكونية ، وفي البند الثاني سرد لمختلف مراحل اكتشاف الأشعة الكونية ، في البنـد الثالث تعريف الأشعة الكونية الابتدائية و وصف لمختلف الجسيمات التي تدخل في تركيبها ، في البنـد الرابـع تحليـل للطيف الطاقوي للأشعة الكونيـة الابتدائيـة وعلاقة الطاقة بالتدفـق ، في البند الخامس تعريف الأشعة الكونية الثانوية و وصف لمختلف الجسيمات التي تشكل بنيتها المادية وعرض لمختلف التفاعـلات التي تحدث داخل الغلاف الجـوي للأرض ، في البند السادس عرض لعمليـة تشكل وتطور الشـلالات الهوائيـة ، في البند السابع ملخص لمختلف عمليات رصد الأشعة الكونية ، في البند الثامن وصف لأهـم النظريات المطروحة لتفسير أصل (مصدر) الأشعة الكونية ، في البند التاسع والأخير وصف لتأثير الحقـل المغناطيسي الأرضي على الأشعـة الكونيـة من حيث التأثيـر على قيـمة التدفـق وكـذا عمليـة القطع المغناطيسي .

1-1 تعريف الأشعة الكونية

الأشعة الكونية هي جسيمات مشحونة عالية الطاقـة ترد إلى الأرض بشكل مستمر وبتجانس من مختلف مناحي الفضاء تسمى الأشعة الكونية قبل دخولها الغلاف الجوي أشعة كونية ابتدائيـة وفيها نجد انوية كل العناصر الكيميائية المعروفـة ابتداء من انوية الهيدروجين (البروتونات) إلى غاية انوية اليورانيوم ، تتواجد هاته الانوية في الأشعة الكونية بنسب مشابهة تماما لنسب تواجـدها في النظام الشمسي إذا استثنينا بعض الاختلافات البسيطة لبعض الانوية الثقيلة ، إضافة إلى انوية العناصر الكيميائية نجد أيضا و بنسب ضئيـلة جـدا الالكترونات ، البوزيترونات (positrons) و الفوتـونـات عاليـة الطـاقـة (γ, X) .

تشكل البروتونات المكـون الرئيسي للأشعة الابتدائية إذ تبلغ نسبة تواجدها حوالي أل 85% وتتواجـد انوية الهليوم بنسبة 12% أما باقي المكونات فهي متواجدة بنسب ضعيفة للغاية .

تسمى الأشعـة الكونية بعد دخولها الغلاف الجوي أشعة كونية ثانوية و نجـد فيها بقايا الأشعة الكونيـة الابتدائية إضافـة إلى جسيمات جديدة هي نواتج التصادم بين الجسيمات الابتدائيـة و جزيئات الغلاف الجوي.

تأتي جسيمات الأشعـة الكونيـة بمختلف الطاقات لكن العدد الأكبر منها يأتي بطاقـات تفوق أل 1 Ge وتصل طاقة بعض الجسيمات إلى 10^{21} eV . إن الأغلبيـة العظمى من مكونات الأشعة الكونية هي ذات أصـل مجـري و القـليـل منـها فقـط يأتـي مـن الشمـس بواسـطـة الريـاح الشمسيـة .

2-1 اكتشاف الأشعة الكونية

في نهاية القرن الثامن عشر لاحظ الفيزيائي الفرنسي كلوم (Coulomb) انه عند تعليق كرة مشحونة كهربائيا في الهواء ، فان الكرة تفقد شحنتها مع مرور الوقت ، لم يتمكن شارل كولوم من تقديم تفسير للظاهرة ، وكانت تلك هي المرة الأولى التي تشاهد فيها آثارا تعزى للأشعة الكونية . بعد مرور حوالي مئة عام ، و باستخدام وسائل أكثر تقدما ، أعاد الفيزيائي البريطاني ويلسون (Willson) (استخدم الكتروسكوبا ذو صفائح ذهبية) تجربة كلوم وذلك لإثبات نافلية الهواء للكهرباء (أعاد تلك التجارب كل من ايلستر (Elster) و جيتل (Geitel)) تم تفسير نافلية الهواء بوجود إشعاع مؤين في الغلاف الجوي لكن أصل هذا الإشعاع لم يكن واضحا .

شهدت تلك الحقبة (1895-1900) اكتشاف النشاط الإشعاعي الطبيعي ، ففي عام 1895 اكتشف رونتنجن (Rontgen) الأشعة السينية و في السنة الموالية لاحظ بيكرل (Becquerel) أن أملاح اليورانيوم (uranium) تصدر إشعاعا له القدرة على تايين الهواء ، دون أن يحدد طبيعتها ، بعد سنتين (1898) تمكن روذرفورد (Rutherford) من تحديد طبيعة اثنتين من تلك الإشعاعات وأطلق عليهما إشعاع α و إشعاع β ، عام 1900 حدد الفرنسي فيلارد (Villard) طبيعة الإشعاع الأخير وأطلق عليه إشعاع γ .

بعد هاته الاكتشافات أصبح السؤال المطروح هو : هل للنشاط الإشعاعي الطبيعي علاقة بالناقلية الهوائية للكهرباء أم أنها تعود لإشعاع خارجي أم للهواء نفسه .

بين روذرفورد (Rutherford) أن الإشعاع المؤين يأتي من خارج الجهاز ، حيث لاحظ انه بوضع هذا الأخير داخل صندوق من الرصاص ، فان سرعة تفريغ الشحنة الكهربائية تقل كلما زاد سمك جوانب الصندوق .

من اجل تبيان تأثير النشاط الإشعاعي الطبيعي على التجربة ، قام وولف (Wulf) سنة 1910 بإعادة التجربة في أعلى برج أيفل (200 متر) فلاحظ استمرار حدوث التفريغ الكهربائي لكن بسرعة أقل .

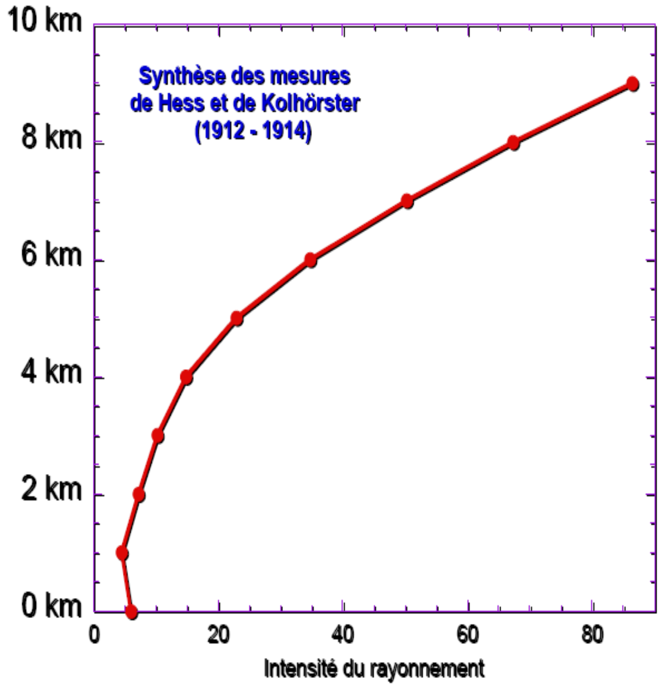
- باستخدام المنطاد قام الفيزيائي النمساوي هاس (Hess) بإجراء تجاربه حول التفريغ الكهربائي على ارتفاعات مختلفة حتى بلغ سنة 1913 ارتفاعا قدره 9 كلم ، فوجد أن سرعة التفريغ تزداد مع الارتفاع (الشكل 2-1) فخلص بذلك إلى إن مصدر الإشعاع المؤين المسبب للتفريغ الكهربائي يقع في الفضاء الخارجي .

بعد أعمال هاس و تجارب أخرى عديدة (أجريت تحت الماء و في الأنفاق) و التي رجحت كلها فرضية المصدر الخارجي ، أطلق ميلكان (Millikan) على النوع الجديد من الإشعاع اسم الأشعة الكونية.

بعدما حصل الإجماع على الأشعة الكونية ، أدت التجارب التي أنجزها ريجنر (Régner) **و بعـده فوتزر** (Pfotzer) **إلى إثـارة الشكوك من جـديـد . استخـدم فوتزر عداد جيجر-ميلر** (Geiger-Muller) **لقياس شدة الإشعاع المؤين على ارتفاعات مختلفـة ، فوجـد أنها تزداد مع الارتفاع إلى أن تأخذ قيمـة عظمى على ارتفـاع** 15 **كلم ، ثم تبـدأ بالتناقص (الشكل** 1-3**) .**

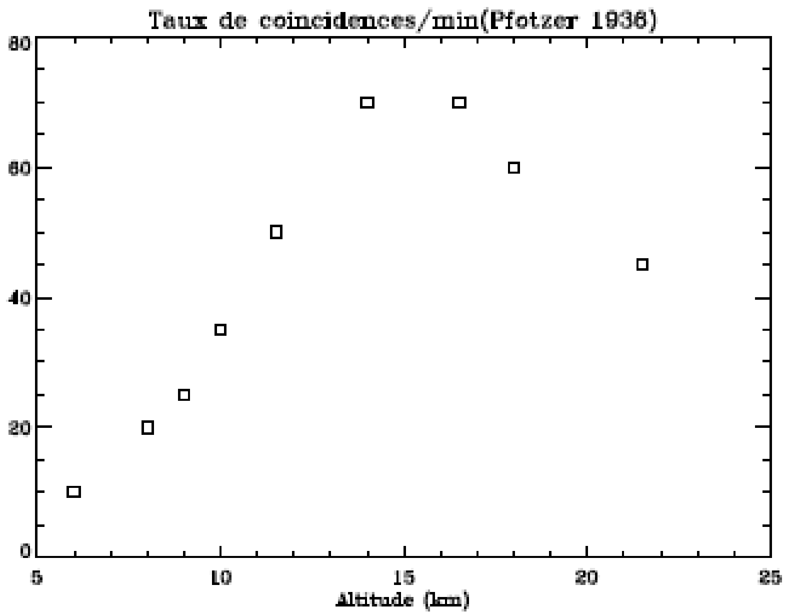
بدا الأمر وكان مصدر الإشعاع يقع على ارتفاع 15 **كلم ، و بالرغم من الشكوك التي أثارتها هاته النتائج إلا أنـها أدت في النهاية إلى تأكيد فرضيـة المصدر الخارجي ، فقد سمحت هاته النتائـج بالتمييـز بين الجسيمات الابتدائيـة (التدفق الابتدائي) الآتي من خارج الغلاف الجوي و الجسيمات الثانوية (التدفـق الثانوي) الناتجة عن تصـادم الأولى مع الغلاف الجـوي و تأكيد تأثير التخامد نتيجة الانتشار في الغلاف الجـوي .**

- سنـة 1933 **و أثناء رصده للآثار التي تتركها الأشعـة الكونيـة في غرفة الغيـوم** (cloud chamber) **اكتشف أندرسون** (Anderson) **جسيما جديدا له نفس كتلة الإلكترون و يحمل شحنة موجبة ، مثل هذا الاكتشاف إثباتا لنظرية ديـراك** (Dirac) **عن وجود المادة المضـادة سمـي هذا الجسيـم البوزيتـرون .**



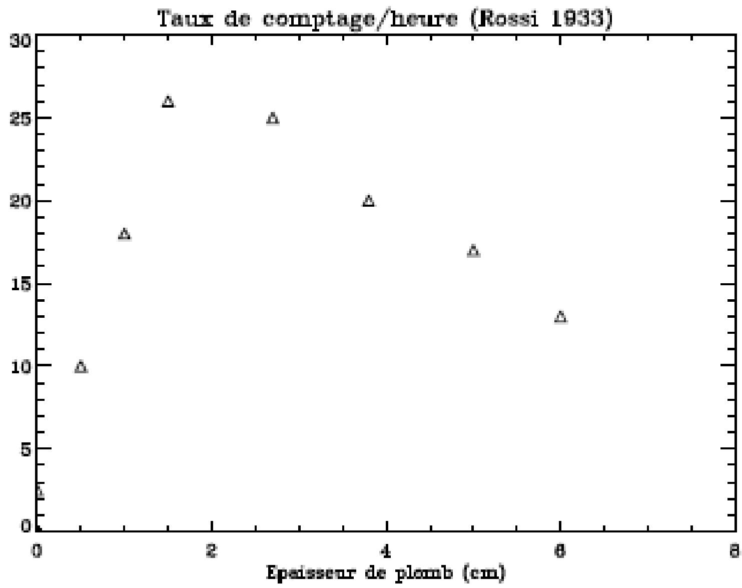
الشكل 1-1

نتائج قياسات هاس و كولوستر (Hess and Kolhorster) **حول معدل التفريغ الكهربائي بدلالة الارتفاع .**



الشكل 1-2

نتائج أعمال فوتزر (Pfotzer) **حول معدل التفريغ بدلالة الارتفاع .**



الشكل 1– 3

نتائج أعمال روسي (Rossi) **حول اختراق الإشعاع المؤين لطبقة من الرصاص .**

- سنة 1935 و نتيجة لأعماله التي تمثلت في قياس اختراق الأشعــة الكونية لطبقات مختلفــة السمك من الرصاص (الشكل 1-4) خلص روسي (Rossi) إلى أن الأشعة الكونيــة تحتوي مركبتين ، إحداهما خفيفة (soft) ضعيــفة الاختراق (أغلبيتها الكترونات) والأخرى قاسيــة (hard) ولها قدرة كبيرة على الاختراق (أغلبيتها بروتونات).

- سنة 1937 ، و باستخدام غرفة الغيوم اكتشف كل من أندرسون و نيدرماير (Neddermeyer) الميــون (muon) .

- سنــة 1938 قام اوجير (Auger) بوضع عدادين من نوع جيــجر-ميلر على مرتفعات جبــال الألب تفصل بينهما مسافة قدرها 300 متر ، فلاحظ أ نما يرصدان جسيمات في نفس الوقت ، ففســر ذلك بتساقط عدد كبير من الجسيمات على شكل حزم عريضة ، تمثل هاته الجسيمات نتيجة تصادم جسيمات ابتدائية ذات طاقات عالية بجزيئات الغلاف الجوي ، سميت تلك الحــزم الجسيميــة بالشلالات الهوائيــة (air showers) ، و قــد قـــدر اوجير (Auger) طاقتــها آنذاك بحــوالي 10^{15} eV .

- في نفس الفترة قدم ستورمر (Stormer) ، نظريته حول تأثير الحقل المغناطيسي الأرضي على الأشعــة وبين انه يلزم لكل جسيم حد أدنى من الطاقة كي يتمكن من اختراق الحقل المغناطيسي الأرضي وبلــوغ الأرض .

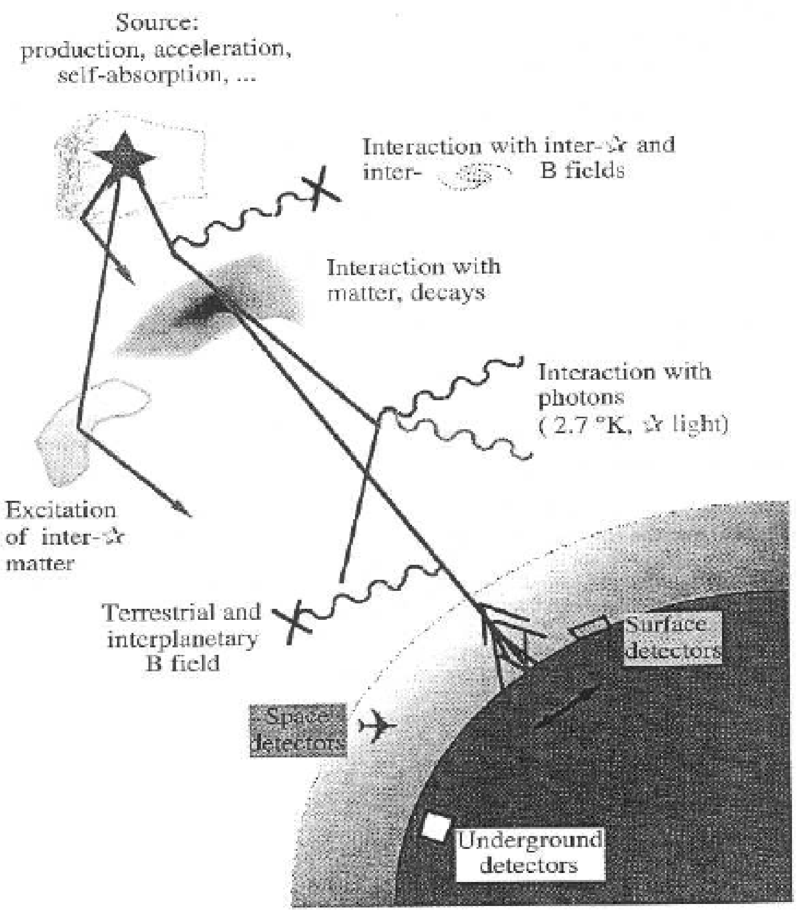
- سنــة 1948 اثبت كــل من جوتليب (Gottlieb) والن (Allen) أن الأشعــة الكونيــة تتشكــل من ا لبروتونات ، انويــة الهليوم و انوية أخرى أثقـــل .

- سنــة 1949 وضــع فيرمي(fermi) نظرية الصدمات الموجيــة (shock wave) كآلية لتسريع جسيمات الأشعــة الكونيــة .

3-1 الأشعة الكونية الابتدائية primary cosmic ray

يتعرض الإشعاع الكوني بعد مغادرته لمصدره و انتشاره في الفضاء إلى بعض التغيرات التي تمــس بنيتــه وسرعته ، وذلك نتيجة مروره عبر الحقول المغناطيسية وكذا الغازات المنتشرة في الفضاء (الشكل 1-4) . عنــدما يقترب هذا الإشعاع من الأرض ، يتعرض إلى تحويرات أخرى من قبل الرياح الشمسية ، حيث تقــوم هاته الأخيــرة بإبطاء الجسيــمات منخفضة الطاقــة و إقصاء جزءا منها ، وعليــه فان كثافــة الجسيــمات منخفضة الطاقــة (الأقل من 10 GeV) هي على علاقــة وطيدة بالنــشــاط الشمســي .

يسمى الإشعاع الحاصل عند بلوغه الطبقة العليا للغلاف الجوي و قبل دخوله في أي تفاعل معه بالأشعـة الكونية الابتدائية .

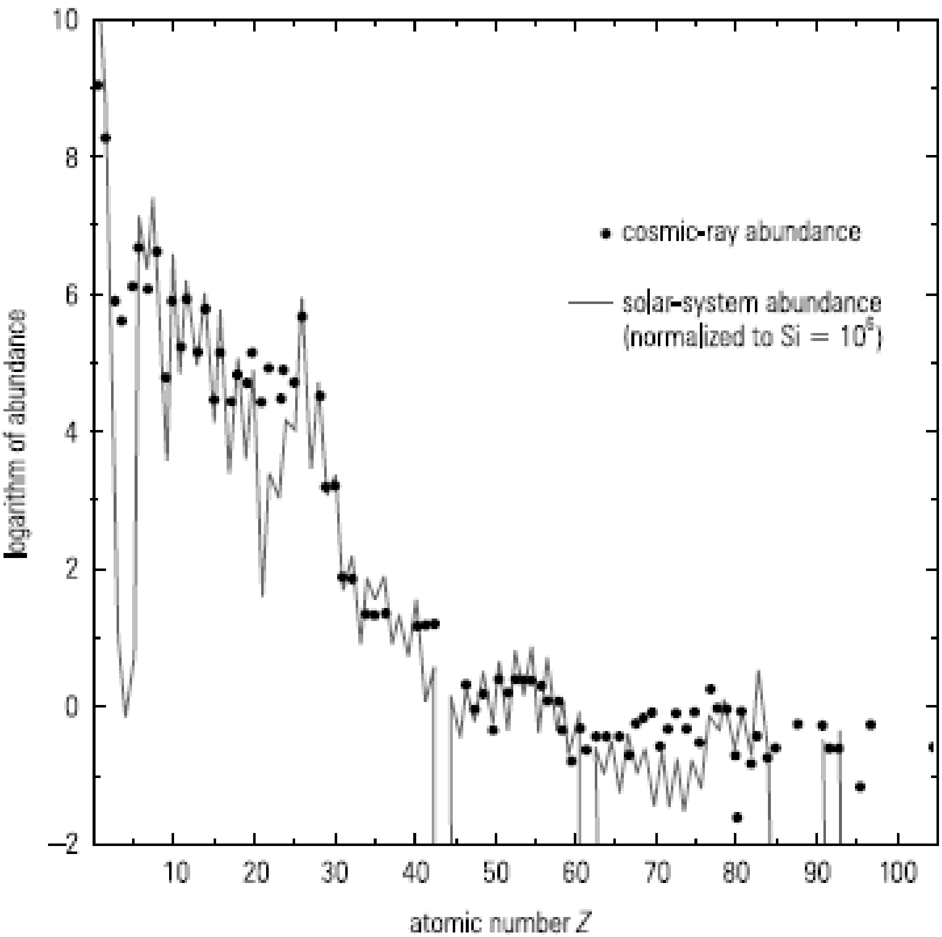


الشكل 1– 4

تشكل ، انتشار و رصد الأشعة الكونية .

تتضمن الأشعة الكونية الابتدائية كل الجسيمات المشحونة المستقرة (زمن الحياة اكبر من 10^6 سنة) وكذا كل انوية العناصر الموجـودة بالجدول الدوري ، ابتداء من انوية الهيدروجيـن (البروتونات) ووصولا إلى اليورانيـوم ،كل العناصر الموجـودة في الأشعة الكونية هي نفسها الموجـودة في النظام الشمسي ، هناك اختلاف فقـط في نسبة تواجد بعض العناصر كالليثيوم (lithium) و البيريليوم (biryllium) و البـورون

(boron) و بعض العناصرالاخف من الحديــد (iron) حيث تتواجد بنسبة اكبر في الأشعة الكونية و يمكن تفسير ذلك بإنتاج هاته الانويــة أثناء تفاعل الجسيمات الابتدائية مع الوسط البين- نجمي (الشكل 1-5).



الشكل 1– 5

نسبة تواجد العناصر الكيميائية في الأشعة الكونية

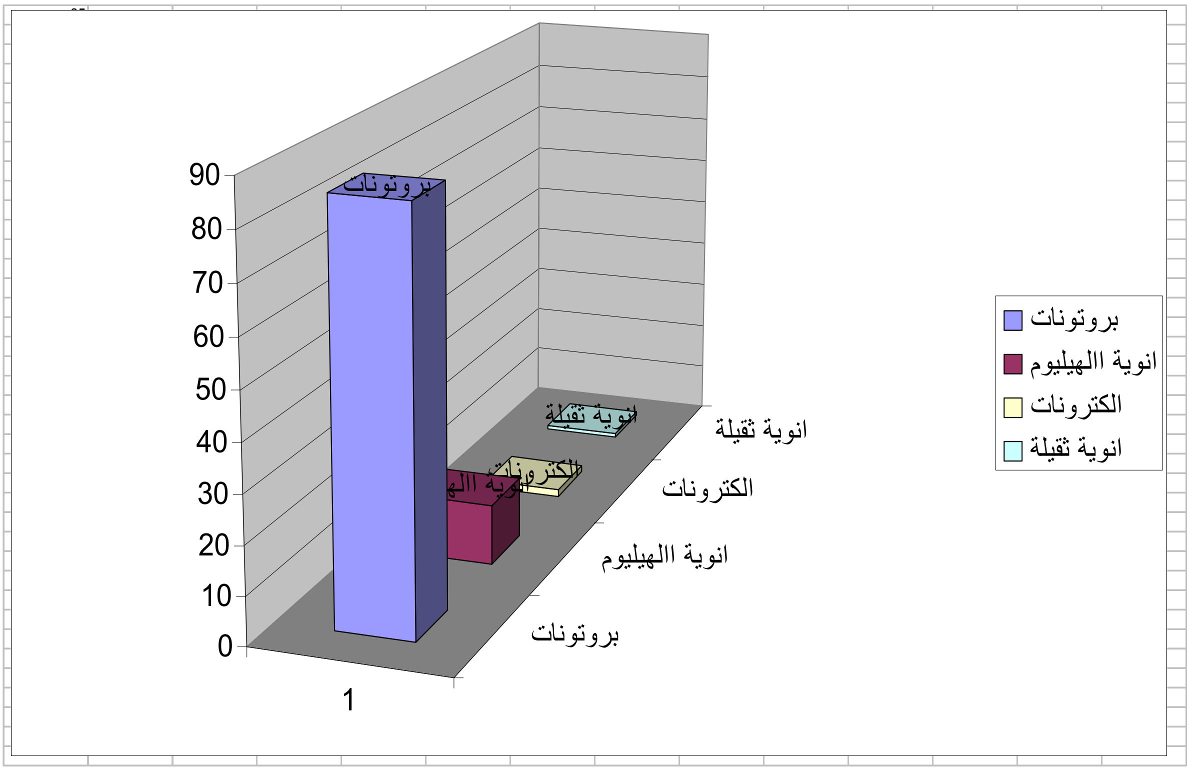
مقارنة بنسبة تواجــدها في النــظام الشــمسي .

يمكــن تقسيــم مكونــات الأشعــة الكونيــة الابتدائيــة إلــى مركبتيــن همــا :

المركبة الأولى و تشمل الجسيمات و الانوية التي تأتي من المصــدر مباشرة ومكوناتــها هي الالكترونات

البروتونات ، انويـة الهليـوم (جسيمات α) ، الكربـون (carbon) **، الأكسجين** (oxygen) **، الحديـد وكـل الانويـة التي يتـم تركيبـها داخـل النجـوم .**
المركبة الثانية و تشمل نواتـج تصادم مكونات المركبة الأولى مع الغازات البيـن- نجميه و مكونا ا هي مضادات البروتونات (antiprotons) **، البوزيترونات والانوية التي لا تتشكل داخـل النجـوم مثل انوية الليثيوم ، البيريليوم و البورون .**

تتواجد البروتونـات (انـوية الهيدروجيـن) في الأشعـة الكونيـة الابتدائيـة بنسبة 85% **وتتواجـد انويـة الهليوم بنسبـة** 12.5% **، الانويـة الأثقل تشكل نسبة** 1% **و تشكل الالكترونات نسبـة** 1.5% **وتتواجـد الفوتونات بنسبة ضئيـلة جدا . إن هاته النسب صالحـة على الأقـل لكل الطاقات الأقـل من** 1 TeV **(الشكل** 6-1**) .**



الشكل 6-1
النسبة المئوية لمختلف مكونات الأشعة الكونية الابتدائية .

1-4 الطيف الطاقوي للأشعة الكونية الابتدائية energy spectra

تشكل السلسـلة الطاقوية لجسيمات الأشعة الكونية الابتدائية طيفا طاقويا عريضا جدا ، إذ تمتد الطاقات المقيسة لهاته الجسيمات من 10^{8} eV إلى غاية 10^{21} eV .

نعبر عن الطيف الطاقوي للأشعة الكونية بواسطة التدفق التفاضلي (و هو عدد الجسيمات التي تملك طاقة تقع في ا ال $E + dE$ و E ، أوبواسطة التدفق التكاملي و هو عـدد الجسيمات التي تملك طاقة مقدارها E

توجد عدة طرق لقياس (تعريف) التدفق ، أهمها مايلي:

- عدد الجسيمات (الانوية) بدلالة الطاقـة الكلية E_0 . يناسب هذا التعريف التجـارب التي لا تميـز ولا تكشف طبيـعة الجسيمات الابتدائية .

- عدد الجسيمات (الانوية) بدلالة الطاقة لكل نوكليون (E_0/A) حيث A هو العـدد الكتلي ، تحفـظ التفاعلات النووية (الانشطارات) تقريبا النسبة E_0/A ، لذلك يناسب هذا التعريف دراسة التفاعلات مع الوسط البين-نجمي (inter-steller) .

- عدد النوكليونات بدلالة الطاقة لكل نوكليون E_0/A ، تتفاعل الانوية ذات العدد الكتلي A والطاقـة E_0 كأ ا حزمـة من A نوكليون مستقل بطاقة E_0/A ، وعليه فان هاته الطريقـة مناسبة لتتبـع إنتـاج الجسيمات الثانوية كالميونات في الغلاف الجوي الأرضي أو النيوترينوات في الغلاف ألنجمي.

- عـدد الجسيمات بدلالة العطالة المغناطيسيـة (rigidity) ، يناسب دراسة انحباس و تسريـع الأشعة الكونية عندما تتفاعل مع الحقول المغناطيسية (مستقرة أو متغيرة).

يتميـز مخـطط الطيـف التفاضـلي للطاقـة بالانتظام الشبـه تام (الشكل 1-7) و خصوصا في ا ال eV $(10^{10}\text{-}10^{19})$ ينقسـم هذا ا ـال إلى قسميـن :

-القسم الأول و يشمل ا ال الطاقوي eV $(10^{10} - 4\times10^{15})$ ، في هذا ا ال يتغير التدفق التفاضلـي مع الطاقـة وفـق الصيـغـة التاليـة :

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-2.7}$$

جسيمات هذا المجال هي ذات أصل مجري (عمليات السوبرنوفا (supernovae) **و النجـوم النيوترونيـة** (neutron stars) **لان التفاعل بين الجسيـمات منخفضة الطاقـة و تلك المتبقيـة من الانفجار العظيم يفسر تماما المعادلة السابقة ، نظرا لكون التدفق ذو قيمة معتبرة فان رصـد جسيـمات هذا النطاق ممكن بواسطة الأقمار الصناعية و البالونات .**

-القسم الثاني و يشمل المجال eV (10^{16}-10^{18}) **،في هذا المجال يتغير التدفق التفاضلي مع الطاقة وفق العبارة التالية:**

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-3.2}$$

من الناحية الطاقوية لا يوجد أي جرم مجري له القدرة على إصدار هكذا جسيمات و لذلك فان مصـدر جسيمات هاته المنطقة يقع خارج مجرتنا (التصادمات بين المجرات و كذا المجرات ذات الانوية النشـطة) .

تسمى المنطقـة التي تربط بين هذين القسمين و التي تشغل المجـال eV (4×10^{15}-10^{16}) **، الركبة** (knee) **في هذا المجـال يتناقص التدفـق التفاضلي بشكل أسرع حيث يتناسب مع الطاقة تقريبا وفـق العلاقة :**

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-3}$$

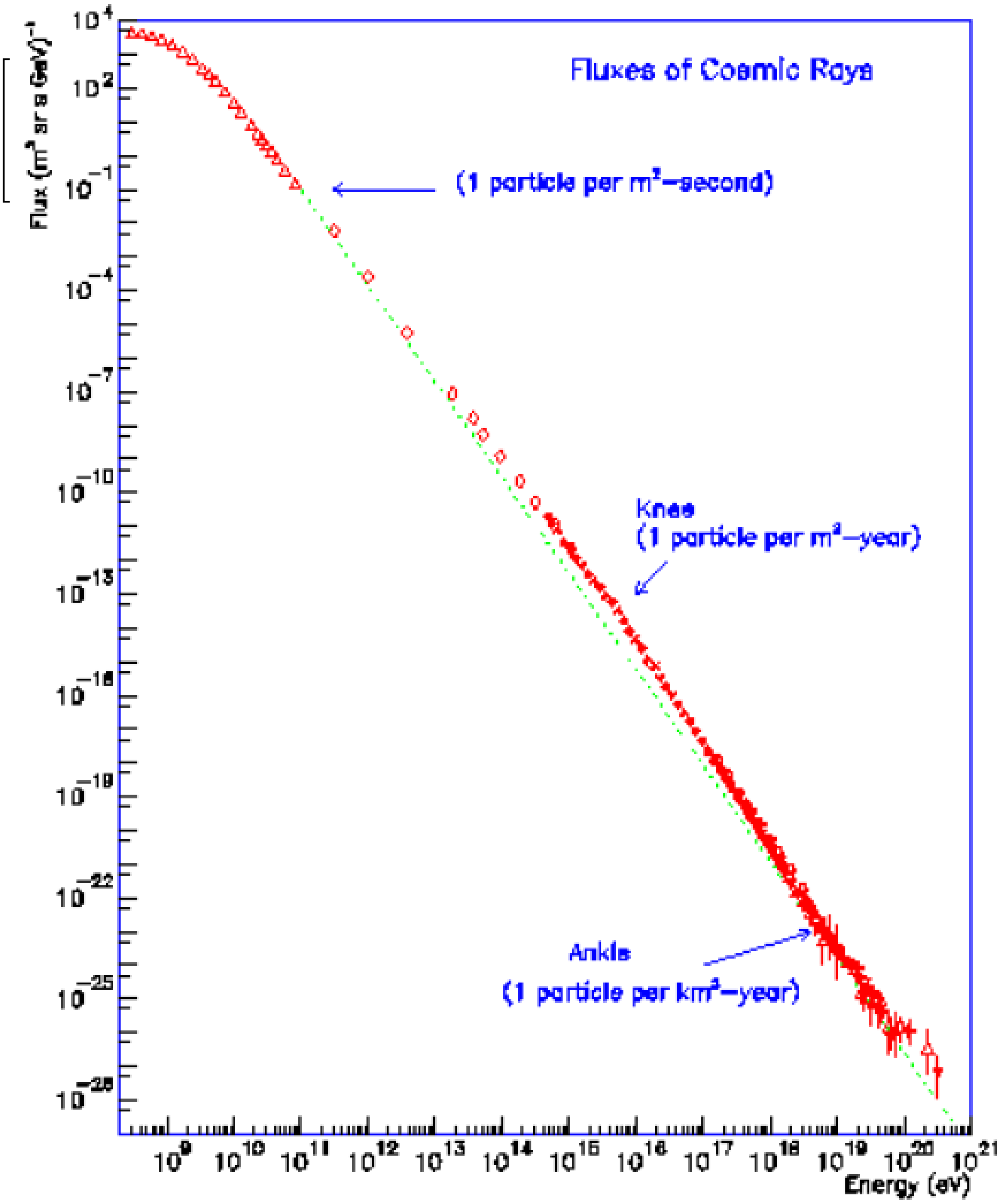
يقدر التدفق في هذا المجال بحوالي جسيم واحد لكل متر مربع في السنة ، ويمكن إرجاع ذلك إلى احتجـاز جسيمات هذا المجال من قبل المجرة (قطع مغناطيسي) كما يمكن إرجاعه إلى التفاعـل مع المادة المظلـمة (dark matter) [1] **.**

بينت بعض التجارب أن الطاقـة في هذا المجال تتناسب مع الشحنة ، و أن البنيـة الماديـة له تتشكل من الانوية الخفيفـة (البروتونات و الجسيمات α **) (الشكل** 1-8) **.**

بالنسبة للجـزء المتبقي من مجمل مخطط الطيف الطاقوي التفاضلي نجد المجال الأول الذي يشمل الطاقات 10 GeV **، جسيمات هذا المجال يأتي معظمها من الشمس و هي الالكترونات والنيوترينوات الناتـجة عن الاندماج النووي الحراري .**

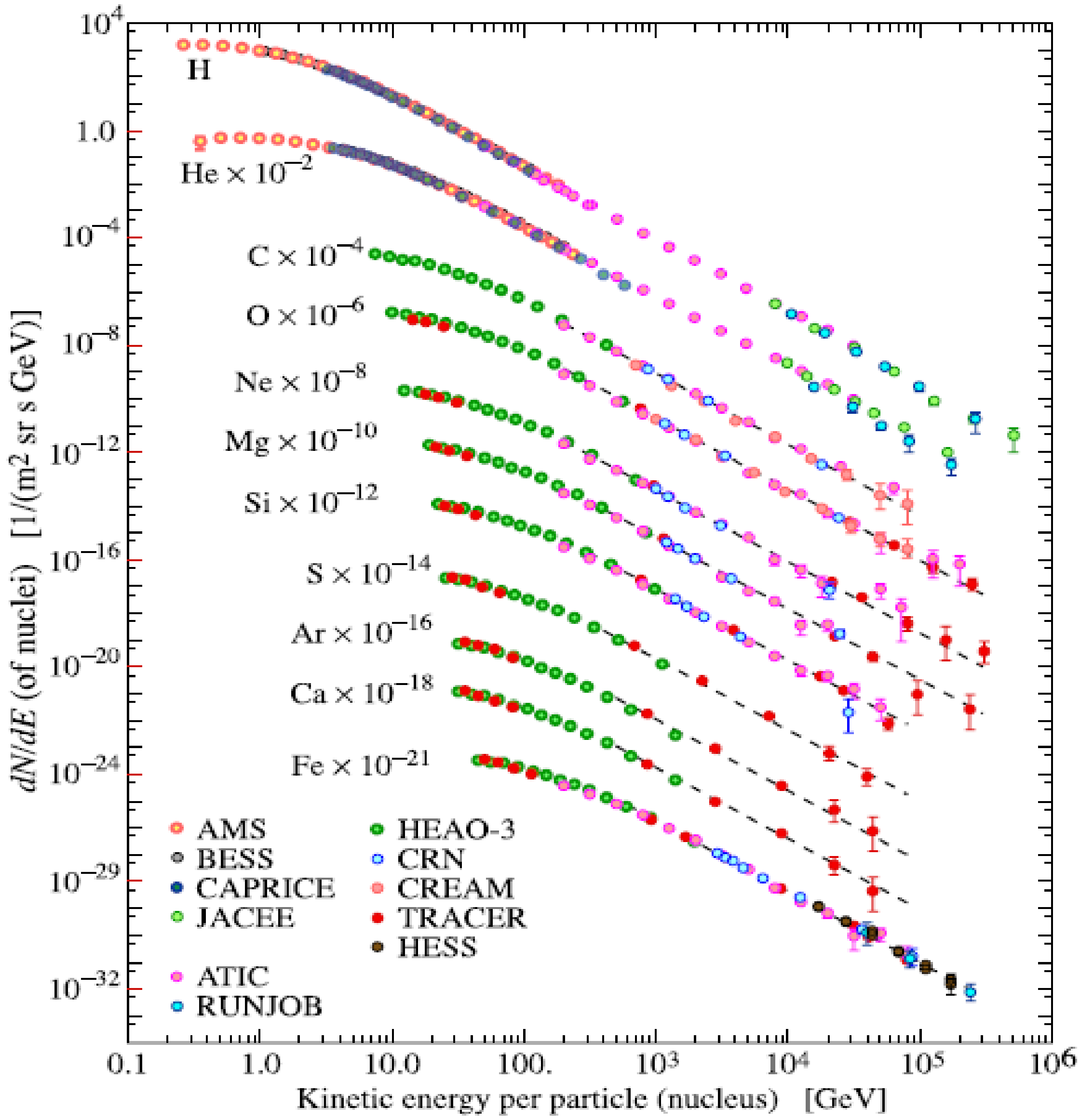
المجال الأخير ويشمل الطاقات الأعلى من eV 5×10^{18} **، في هذا المجال يتغير التدفق التفاضلي حيث تقـل**

سرعة التناقص على عكس ما يحدث عند الركبة . عدد الجسيمات الواردة بالنسبة لهذا ا ال قليـل جدا إذ يقدر بجسيم واحد لكل كلمترمربع خلال سنة كاملة ، إن هاته الندرة لا تمكـن حتى من رسم مخطط .



الشكل 1– 7

الطيف الطافوي التفاضلي للأشعة الكونية الابتدائية .



الشكل 1– 8

البنية المادية للطيف الطافوي التفاضلي للأشعة الكونية الابتدائية .

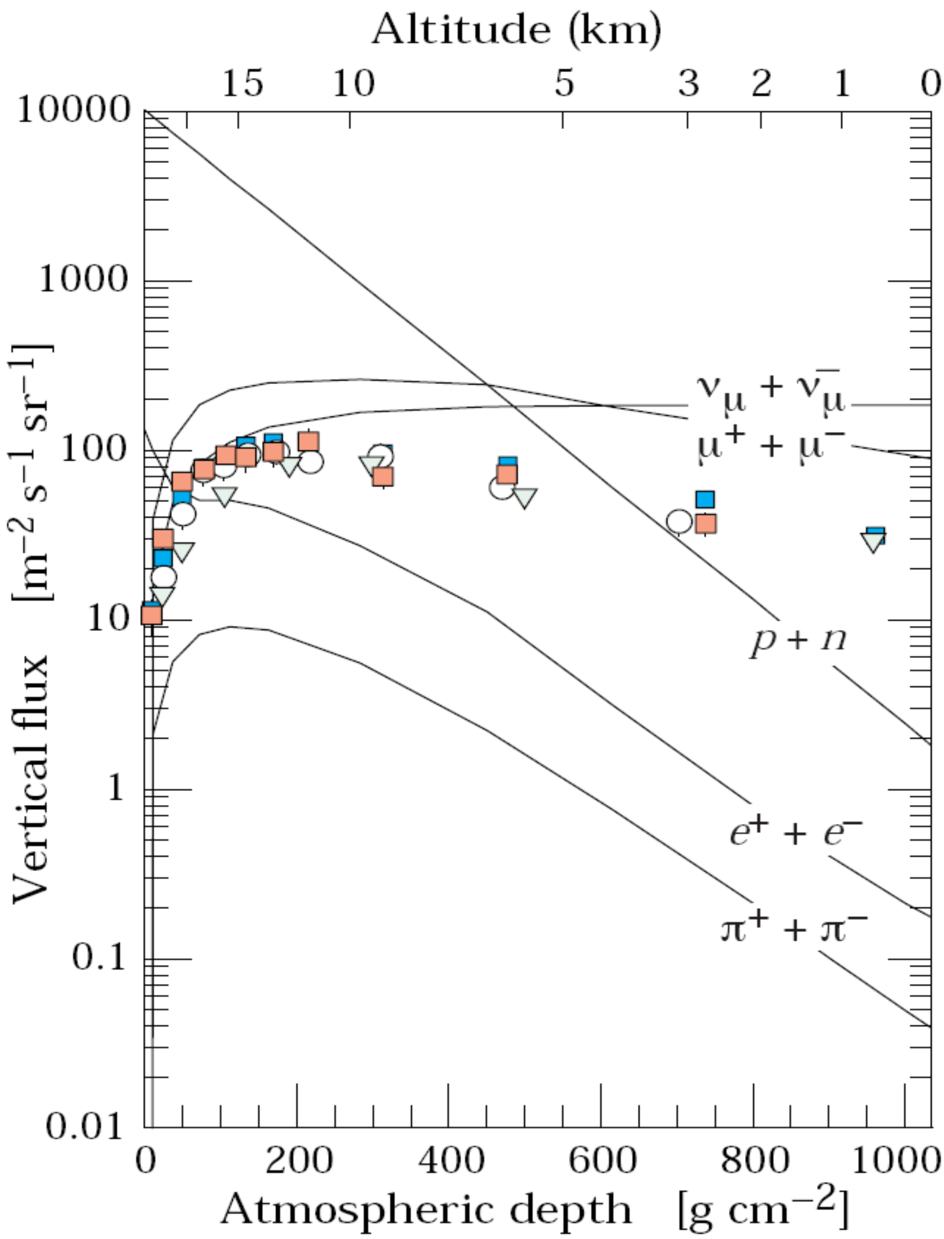
5-1 الأشعة الكونية الثانوية secondery cosmic ray

الأشعـة الكونية الثانوية هي نتيجـة التفاعـل بين **الأشعة الكونية الابتدائية وجزيئات الغلاف** الجـ**وي (الأكسجيـن و الازوت بشكل أساسي) وعليه فهي تتكون من جزأين ، احدهما هو بقايا الأشعة الكونية الابتدائيـة (البروتونات و الالكترونات) والجـزء الأخر هو نواتج التفاعـل** بين **الجسيـمات الابتدائية و جزيئـات الهـواء (النيوترونات ، الكاونات ، البيونات ، الميونات ، النيوترينوات و البوزيترونات) .**

إن تركيبة الأشعـة الكونية الثانوية ليست هي نفسها في **مختلف مناطق الغلاف الجوي ، فبعض الجسيمات يختفي نتيـجة طبيـعة تفاعله مع جزيئات الغلاف الجوي و البعض يختفي نتيجة قصر زمن الحياة ، كما أن بعـض الجسيمـات يظهـر فقـط عنـد الطبـقـات السفـلى للغـلاف الجـوي .**
إضافة إلى التغيرات التي تمس البنيـة هناك أيضا التغيرات التي تمس التدفـق ، حيث يتغير التدفـق بدلالة الارتفاع عن سطح الأرض وكذلك بدلالة خطوط العرض ، ويرجع ذلك إلى سببين هما القطع المغناطيسي الناجم عن الحقل المغناطيسي الأرضي والتغير في **كثافة الهواء بدلالة الارتفاع وكذلك بدلالـة خطـوط العـرض . أهم الجسيـمـات التي تشـكل البنيـة المـادية للأشعـة الكونيـة الثانويـة هي :**

الميونات muons

تشكل الميـونات المركبـة الأساسيـة (الأكثر تواجدا) للأشعـة الكونيـة الثانوية بالقرب من مستوى سطح البحـر وتحت سطح الأرض(الشكل 1-9**) ، يتم إنتـاج الميونات** في **الغلاف الجـوي على ارتفاع حوالي** 15**كلم و تفقـد حوالي** 2 GeV **من طاقتـها** في **عمليات تاييـن الهـواء قبـل أن تبلغ سطـح الأرض بطاقـة متوسطها** 4 GeV **.**
يتأثر الطيف الطاقوي للميونات و تدفقها بالنشاط الشمسي و الحقل المغناطيسي الأرضي والفقد الراجـع إلى عمليات تايين الهواء . فمثلا الميونات التي تساوي طاقتها 2.4 GeV **تستطيع أن تقطع مسافـة** 15**كلم قبل أن تتفكك لكنها** في **الواقع لا تقطع سوى مسافـة** 8.7**كلم نتيجـة ما تفقده من طاقـة** في **عمليات تايين الهـواء . كما أن تدفق الميونات التي طاقتها** 1 GeV **ينخفض بمعـدل 10%** تحت **تأثير النشـاط الشمسي و الحقل المغناطيسي الأرضي . يقدر التدفق التكاملي العمودي للميونات عند الطاقـات الأعلى من** 1 GeV/c **عنـد مستوى البحـر بحوالي** $70\ m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$ [2 – 3] **بينما تعطي القيـاسـات الحديثـة قيـمة اقـل بمقـدار** (15% -10%) [4 – 5] **.**



الشكل 1– 9

يظهر هذا الشكل التدفق العمودي لأغلب مكونات الأشعة الكونيـة في الغلاف الجـوي في ا ال الطاقوي الذي يتواجد فيه اكبر عدد من الجسيمات($E > 1\ \mathrm{GeV}$) (عدا الالكترونات التي تتواجد بأكبر عدد في جوار طاقتها الحرجة التي هي حوالي 81 MeV) ، تمثل النقاط القيم المقيسة لتدفق الميونات السالبة [6 – 7] .

المركبة الكهرومغناطيسية

قسم من هاته المركبة (الالكترونات ، البوزترونات و الفوتونات) هو من بقايا الأشعة الكونية الابتدائيـة و القسـم الأخر ينشا ضمن الشلالات الهوائية نتيجة تفكك الميزونات (misons) المحايدة و المشحـونة . يشكل تفكك الميونات المصـدر الرئيسي للالكترونات منخفضة الطاقة عند مستوى سطح البحـر، بينما يشكل تفكك البيونات المحايدة π^0 المصـدر الأكثر أهمية في الأماكن المرتفعة . تساهـم أيضا عمليـات القرع (knock-on) و بنسبـة ضئيلة في إنتـاج الالكترونات منخفضة الطاقـة [8]. يقـدر التدفـق التـكاملي العمـودي للالكترونات والبوزترونات (positrons) معا عنـد مستوى سطح البحـر بحوالي (0.2-6-30)$m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$ عند الطاقـات (1000-100-10) MeV [2 – 9] علـى التوالي أما القيمة الدقيـقة فهي ترتبط بحساسية كبيرة بالارتفاع . نسبة الفوتونات إلى الالكترونات والبوزيترونات معا هي تقريبا 1.3 عنـد الطاقـات الأعـلى مـن 1 GeV و 1.7 عنـد الطاقـات الأقـل من الطاقـة الحرجـة [10].

ألانوية الثقيلة heavy nuclei

تختفي الانوية الثقيلة بشكل كلي في الطبقات العليا للغلاف الجـوي لأ ا عندما تتفاعل مع جزيئات الهواء تنشطر معطية انوية اخف ، كما أن الانوية تفقد طاقتها بمعدل كبير في عمليات تايين الهواء حيث يتناسب معدل فقد الطاقة مع الشحنة $\left[-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} \propto Z\right]$ وعليه فان الانوية الثقيلة لا يمكنها بلوغ سطح الأرض .

النوكلونات nucleons

يتم إنتاج النيوترونات في الغلاف الجـوي نتيجة التفاعلات بين الهادرونات و البروتونات عالية الطاقة مع الانوية ، تمتلك النيوترونات المنتجة طاقة تتراوح مابين 10^3 eV و 500 MeV ، يتناقص عدد النيوترونات أثنـاء انتشـارها في الغلاف الجـوي نتيـجة التفاعلات القوية مع الانويـة وفـق العلاقـة التالية :

$$N(X) = N_0 e^{-\frac{X}{\Lambda}}$$

حيـث يأخـذ معامـل التخامـد الخـطي Λ القيـمة 155 gcm^{-2} في الغلاف الجـوي .

يتناقص عدد البروتونات أيضا أثناء انتشارها في الغلاف الجوي وفق نفس العلاقة السابقة ، ويصبح التدفق التكامـي العمـودي عند مستوى سطـح البحـر بالنسبة للطاقـات الأعلى من 1 GeV/c بالتقـريب 0.9 $m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$ [2 – 11] ، أمـا بالنسبـة للنيتوترونـات (neutrons) فهـو نصـف هاتـه القيـمة.

النيوترينوات neutrinos

تتواجد في **الغلاف الجوي كل من النيوترينوات الابتدائية و الثانوية ،تنشا النيوترينوات الثانوية عن تفكك الجسيمات الغير مستقرة كالميونات ، البيونات و الكاونات وتشكل النيوترينوات الميونية المركبة الأساسية.**
يقـدر تدفـق النيوترينـوات عنـد مستـوى سطـح البحـر بالنسبة للطاقـات الأكبر من 1 GeV **بحوالي** [12] $2\times10^{6}cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}$.

6-1 الشلالات الهوائية air showers

من أهم التفاعلات التي تحدث في **الغلاف الجوي** بين **الأشعة الكونية الابتدائية و جزيئات الغلاف الجـوي تلك** التي **تشعلها الجسيمات ذات الطاقات العالية جدا (تفاعـلات نووية) ، حيث يتبـع التصادم الأول بسلسلة من التفاعلات (تصادمات و تفككات) ، ينتج عنها الآلاف وحتى الملايين من الجسيمات الثانوية تسمى هاته السلاسـل ، الشلالات الهوائيـة**(air showers) **، و يوجد نوعين من هاته السلاسل همـا :**

- السلاسل الهادرونية hadronic cascad

و تمثل الحـزم التي تنتـج عن تصادم البروتونات أو الانوية بجزيئات الهـواء ، ينتج عن التصـادم الأول الهـادرونات (الشكل10-1**) و هي البيـونات** π^{+} **،** π^{-} **و** π^{0} **وكذلك الكاونـات** (kaons) $K^{\pm}$ **و** K^{0}
حيث تشكل البيونات الأغلبية العظمى ، زمن حيـاة البيونات المحايـدة π^{0} **قصيـر جدا** (8.4×10^{-17} s)
تتفكـك بعدها إلى فوتوني γ [13]**:**

$$\pi^{0} \rightarrow \gamma+\gamma \qquad (99\%)$$

ينتج عن تفاعل هاته الفوتونات مع الانويـة تشكل الأزواج ($e^{+}e^{-}$ **) :**

$$\gamma \rightarrow e^{+}+e^{-}$$

والأزواج بدورها وعن طريق الكبـح تؤدي إلى إصدار إشعاعات كهرومغناطيسية .
البيونات المشحـونة $\pi^{\pm}$ **ذات الطاقات العالية ينتـج عن تفاعلا ا بيونات أخرى (مشحونـة ومحايـدة) تتكـرر هاته العملية عدة مرات إلى أن تبلغ طاقـة البيونات القيمة الحرجـة** $E_C^{\pi}=9$ GeV **تبدأ عندها بالتفكك إلى ميـونات و نيوترينوات (زمن حياة** $\pi^{\pm}$ **هو** 2.6×10^{-8} s **)**[13] **:**

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm}+\nu_{\mu}(\overline{\nu}_{\mu}) \qquad (\approx 100\%)$$

بعـد مسـار طويـل نسبيـا تتفـكك الميـونات إلى الكترونـات و نيـوتـرينـوات (neutrinos)**:**

$$\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \nu_{e} + \bar{\nu}_{\mu}$$

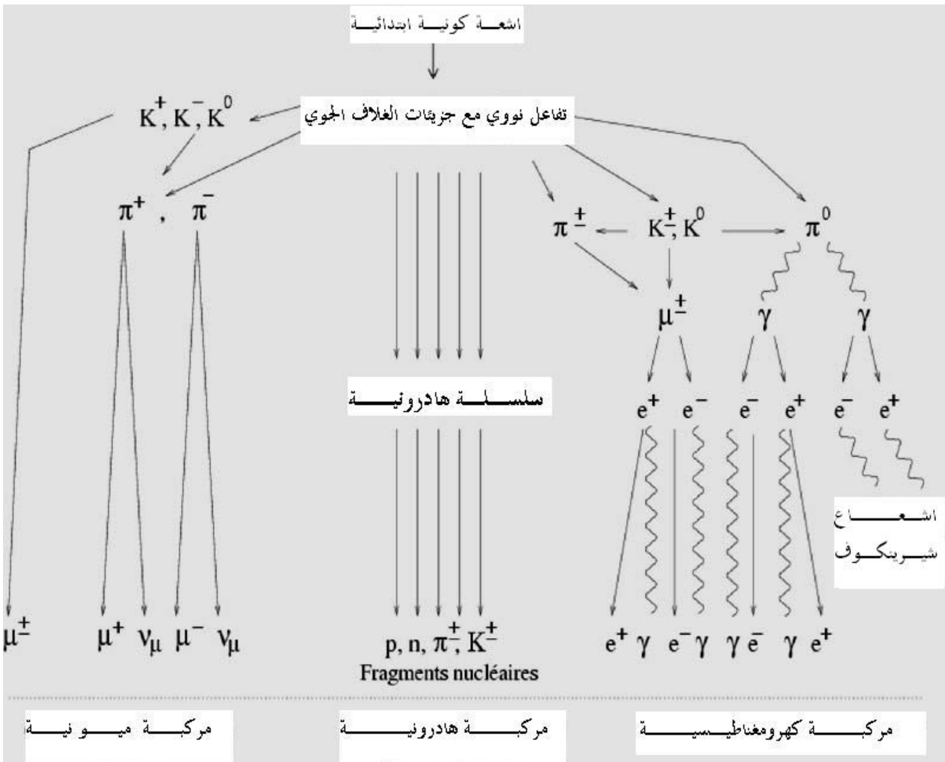
$$\mu^{-} \rightarrow e^{-} + \bar{\nu}_{e} + \nu_{\mu}$$

تتفكك الكاونات وفق قنوات كثيرة ، تظهر فيها جميعا البيونات ، الميونات والأزواج $e^{+}e^{-}$ **والإشعـاع** γ [13]**:**

$$K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^{+} + \pi^{-} \qquad (7\%)$$

$$K^{\pm} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^{0} \qquad (21\%)$$

$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} \qquad (64\%)$$



الشكل 1– 10

مركبات السلسلة الهادرونية .

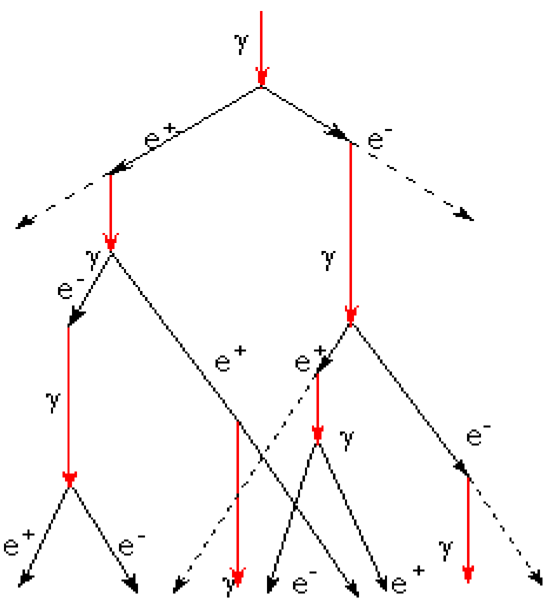
تحتوي الحزم الهادرونية بصفة عامة على ثلاثة مركبات هي ، المركبة الهادرونية والميونية والكهرومغناطيسية مع العلم أن كـل مركبة تأخذ اسمهـا من النواتـج النهائيـة للسلسلة .

-السلاسل الكهرومغناطيسية electromgnetic cascad

وتمثل سلسلة التفاعلات التي تشعلها جسيمات خفيـفة وذات طاقة عالية مثل الفوتونات أو الالكترونات (البوزترونات) ، تحتوي هاته الحزم على الالكترونات ، البوزترونات و الفوتونات ، و تتميـز بالانتـظام و أهم العمليات الفيزيائيـة التي تحدث فيها ، هي تحـول الفوتـونات إلى الأزواج (e^+e^-) ، الإشعاع عن طريق الكبح

$$e^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \gamma$$

و مفعول كومبتون (Compton) **، إضافة إلى عمليات أخرى بمعدلات ضعيفة . بالإضافة إلى تواجـد هاته الحـزم بشـكل مستقـل فإنـها تتواجـد أيـضا بشـكل ثانـوي في الحـزم الهـادرونيـة .**



الشكل 11-1

سلسلة كهرومغناطيسية .

7-1 رصد الأشعة الكونية cosmic ray detection

إن الهـدف من عمليات رصد الأشعـة الكونية هو التعرف على مكونا ا و قياس كمية تواجدكل عنصر من عناصرها (قياس التدفق) ، تنقسم عمليات الرصد من حيث الطريقة التي تتم ا إلى قسمين أساسيين هما ، الرصد المباشـر والرصد الغير مباشر .

1-7-1 الرصد المباشر

في هذا النوع من عمليات الرصد تتعامل الأجهزة بشكل مباشر مع الجسيـمات الابتدائيـة ، لذلك فان هاتـه العمليات تتـم في أماكن عالية كقمم الجبال ، المناطيد ، المركبات الفضائية و الأقمار الصناعيـة . تواجـه هذا النوع من عمليات الرصـد بعض الصعـوبات التقنيـة و المتمثـلة أساسا في عـدم قدر ا على استعـمال أجهزةكبيرة الحجم وكذلك عدم قدر ا على الاستمرار لفترات زمنية طويلة ، وعليه فإ ا لا تستخدم لرصد الجسيمات عالية الطاقة ($E > 1$ TeV) لان هاته الجسيمات تأتي بمعدلات ضعيفة جدا . عمليا تعطي عمليات الرصـد المباشر أفضل النتائج في ا ال الطاقوي الأقل من 1 PeV ، حيث تستطيع الأقمار الصناعية رصد الجسيمات التي لا تزيد طاقتها عن 1 TeV وتستطيع المناطيد رصد جسيمات تصل طاقتـها إلى 100 TeV .

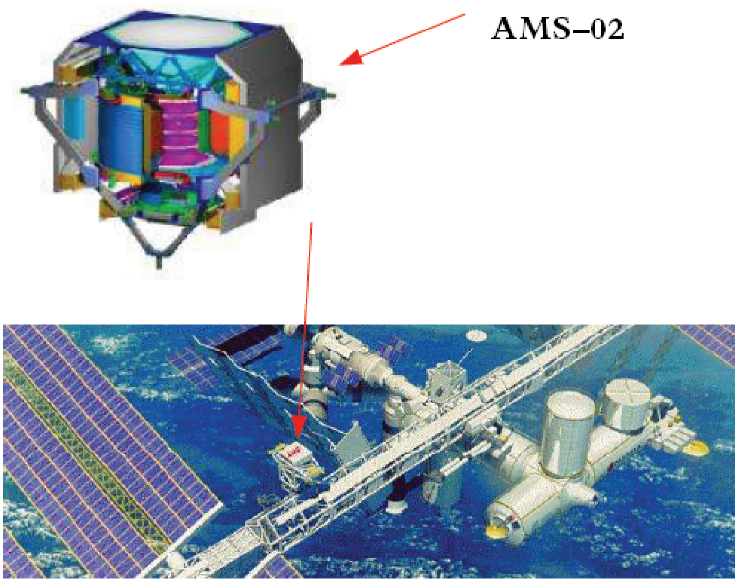
تحـدد الأجهزة المستخدمة في عمليات الرصد المباشر هوية الجسيمات (الكتلة و الشحنة) من خلال قياس المقادير الحركية لهاته الجسيمات و هي : العطالة المغناطيسية ، الطاقة و السرعة . وعليه فان معظم هاتـه الأجهزة يتكون من مجمـوعة أساسية من الكواشف الجسيمية التي تستطيع قياس تلك المقاديـر، وأهمها :

- المطياف المغناطيسي (magnetic spectrometer)
- جهاز تحديد (رسم) المسار (tracker)
- جهاز قياس زمن الطيران (time of flight detector) .

عمليات الرصـد المباشر بصفة عامة تكون مخصصة لدراسة صنف معين من جسيمات الأشعـة الكونيـة وعليه فانه هناك ثلاثة انواع من عمليات الرصد هي :عمليات رصد الجسيمات المشحونة ، عمليات رصد الجـانب الكهرومغناطيسي أي أشعـة γ و الأشـة X وعمليات رصـد النيوترينوات . وفيما يلي سرد لأهم التجارب التي أجريت في مجال الرصد المباشر للأشعة الكونية :

ا – تجارب فضائية لرصد الجسيمات المشحونة :

- التجربة AMS-01 (alpha magnetic spectrometer)
- التجربة PAMELA (payload antimater-mater exploration and light nuclei astrophysics)
- التجربة AMS-02 (الشكل 1-12) و هي النسخة الثانية من AMS-01 .



الشكل 1-12

الجهاز AMS-02 على متن محطة الفضاء الدولية (ISS) .

ب – تجارب فضائية لرصد أشعة γ :

- التجربة EGRET (energetic gamma ray experiment telescope) .
- التجربة AGILE (astro-rivelator gamma a immagini LE ggero) .
- التجربة GLAST (gamma-ray large area space telescope) .

ج – تجارب على متن المناطيد لرصد الجسيمات المشحونة :

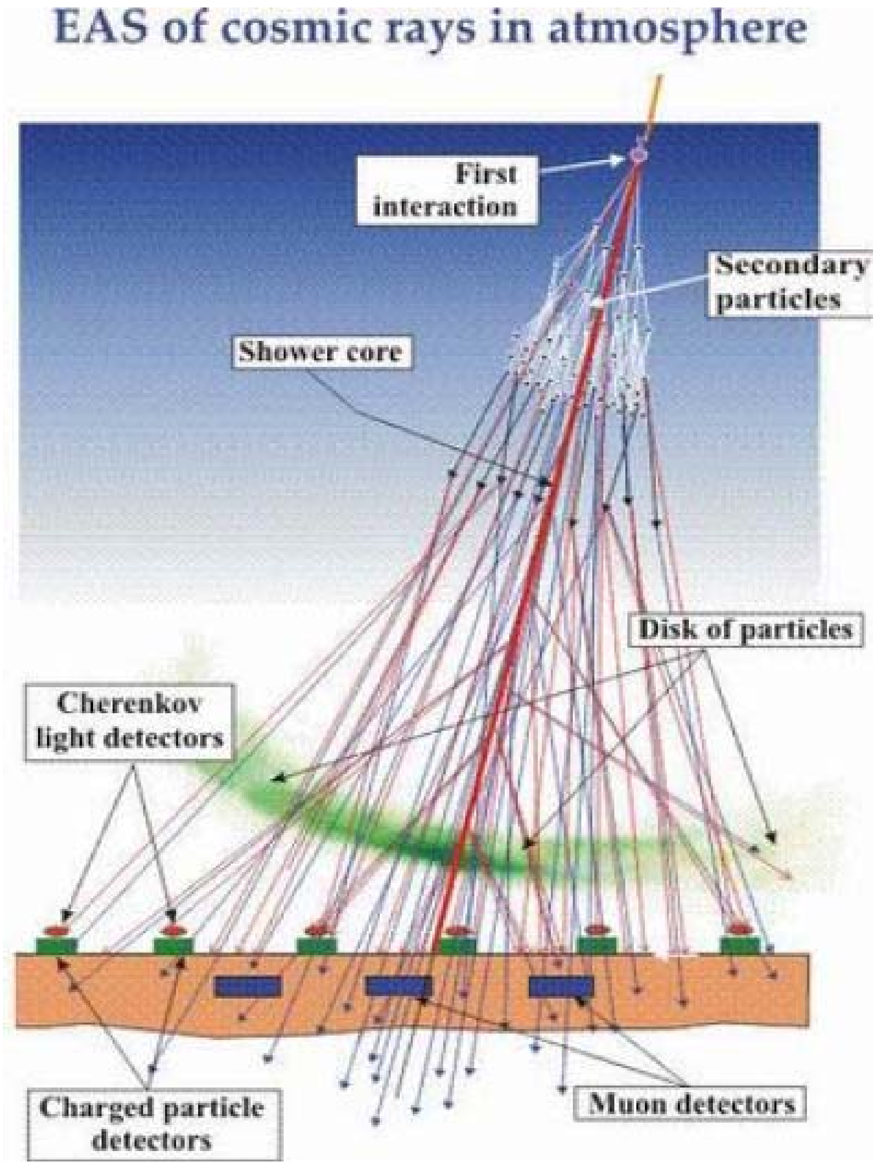
- **التجربة** CREAM (cosmic ray energetics and mass) .
- CAPRICE (cosmic anti-particle ring l maging experiment)
- BESS (ballone-borne experiment with superconducting spectrometer)
- BESS-POLL

1-7-2 الرصد الغير مباشر

ترد الجسيـمات عالية الطاقـة (E > 1 PeV) **بمعدل ضعيف ، حيث يبلغ التدفق التفاضلي عند الطاقات** 1 PeV **حـوالي** $0.6\ m^2y^{-1}sr^{-1}$ **و يقـدر عنـد الطـاقـات العاليـة جـدا** (E≈100EeV) **بحـوالي** $0.6\ km^{-2}sr^{-1}siecle^{-1}$ **. وعليه فان رصـد هاته الجسيمات يتطلب أجهزة ذات مساحـة كبيرة و كذلك يتطلب فترة مراقبة طويلة ، و هي شروط لا تتحقق إلا في محطات أرضية .**
تتفاعل الجسيمات عالية الطاقة مع مكونات الغلاف الجوي و لا يمكنها أبدا أن تبلغ سطح الأرض و عليه فان المحطات الأرضيـة تقوم بالكشف عن هاته الجسيمات من خـلال رصـد الآثار التي تنتج عن تلك التفاعـلات ، و لذلك تسمى هاته العمليات بالرصد الغير مباشر . الآثار التي تنتج عن تفاعل الجسيمات الابتدائية مع جزيئات الغلاف الجوي هي :

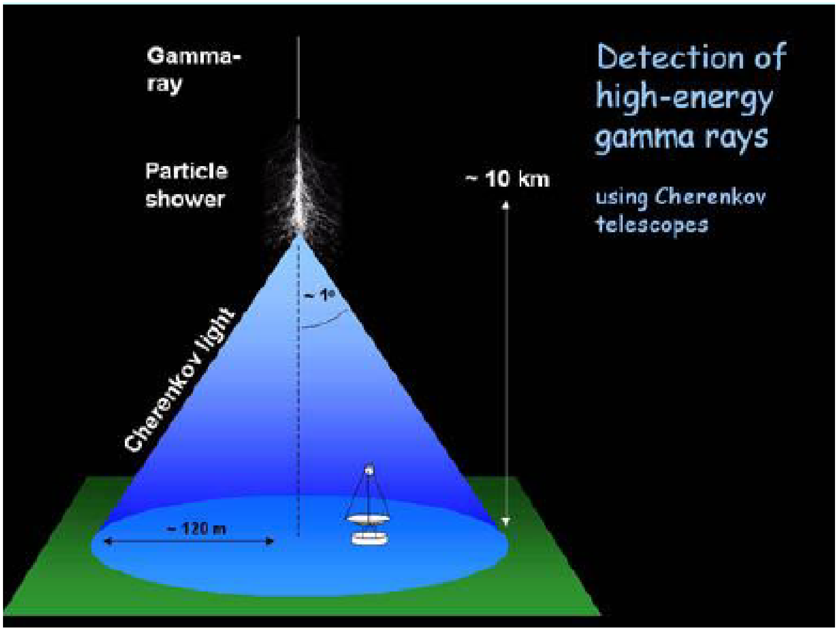
- **الشـلالات الهوائيـة** extenssive air shower **(الشكل**13-1**) .**
- **الإشعـاعـات الضوئيـة : هناك نوعان من هاته الإشعاعات هما إشعـاع شيرينكوف** (cherenkov) **(الشكل** 14-1**) و إشعاع الفلـورة الازوتيـة** (azote fluorescence) .
- **الإشعـاعات الراديويـة** (radio emission) **.**

فيما عـدا الجسيمات الهادرونيـة التي يتم امتصاصها بسرعة داخل الغلاف الجـوي فان كل الجسيمات الأخرى كالالكترونات و البوزيترونات و الميونات و الإشعـاعـات الضوئية و الراديوية تستطيـع كلها بلـوغ سطح الأرض بكميات كبيرة وعبر مسـاحـات واسعة ، كما تستطيـع الميونات والنيوترينوات و الفوتونات γ **عالية الطاقة أن تخترق سطح الأرض و سطح المياه . و هو ما يجعل عمليات الرصد ممكنة من خلال مساحات شاسعة و بالتالي فعالية كبيرة . عمليا تستطيع هاته عمليات رصد كل جسيمات ا ال الطاقـوي الأكبر من** 100 GeV **، و قد مكنت هاته العمليات من كشف جسيـمات نادرة تصل طاقتها إلى** 3×10^{21} eV **.**



الشكل 1-13

مخـطط لعملية رصد جسيمة عالية الطاقة من خلال شلال هائي ، تستطيع هاته المحـطات أن تحدد بشكل مباشر طاقة الجسيمة الابتدائية و اتجاه مجيئها و من ثم نوع هاته الجسيمة . تشتمل مثل هاتـه المحطات على العشرات من الكواشف الجسيميـة . على سبيل المثال تتكون المحطة AGASA **من** 117 **كاشف الكترونات و** 27 **كاشـف ميـونات موزعـة على مساحـة تقارب أل** 100 **كلم مربع .**



الشكل 1-14

رصد أشعة γ من خلال إشعاع شيرينكوف .

من أهم محطات الرصد الغير مباشر نذكر مايلي :

- المحطة اليابانية AGASA (aekeno giant air shower array) . تستطيــع فقط رصــد الجسيــمات الابتدائية التي تزيد طاقتها عن 10^{15} eV .
- المحطة الامريكية HiRes .
- المحطة الأرجنتينية Piere-Auger : مساحــة هاته المحطة 3000 كلمر مربع و تتكون من 1600 جهاز كشف إشعاع شيرينكوف و 3 هوائيات لكشف الفلورة الازوتية .
- المحطة الناميبية Hess (high energy stereoscopic system) : تضم أربعــة هوائيات لرصد إشعــاع شيرينكوف مساحة كل منها 107 متر مربع و يضم كل هوائي 382 مرآة بنصف قطر 0.6 متر .
- المحطة الأمريكية fly's eye : تعتمد على رصد الفلورة الازوتية .

8-1 مصدر الأشعة الكونية origin of cosmic ray

لا يزال مصدر الأشعـة الكونيـة يشكل واحدة من المسائل الفيزيائيـة العالقة ، هناك نظريتان تجيبـان عن هذا السؤال .
تعتمد النظريـة الأولى على مبدأ التسريع و تسمى (bottum-up) ، و تعتمد النظريـة الثانية على عملية التفكك كآليـة لتشكل الأشعة الكونية وتسمى (top-down) . لكل من هاتين النظريتين محاسن وعيـوب (نجاحات و إخفاقـات) فكلاهما يستطيع شرح مصدر جزء من الطيف الطاقوي للأشعـة الكونيـة ولا يستطيع أن يشـرح مصدر الطيف بأكملـه ، تعتبر النظريـة الأولى صالحـة بالنسبة للطاقات الأقل من 1 TeV ، أمـا النظريـة الثـانيـة فهي صـالحـة بالنسبـة للطـاقـات الأعـلى من 1 EeV [14]:

1-8-1 النظرية الأولى bottum-up

في هاته النظـرية يتم مبدئيا التمييـز بين مصدر الجسيمات ومصدر الطاقة (آلية التسريع) ، فقـد تكون مصادر الجسيمات هي نفسها الأماكن التي تتم فيها عملية التسريع وقد لا تكون ، فالجسيمات يمكـن أن تتسرع أو تكتسب طاقات إضافية في مناطق أخرى من الفضاء أثناء الانتشار . من بين الأجرام السماويـة المرشحة لان تكون مصادر متكاملة للأشعة الكونية نجد انفجارات السوبرنوفا ، النجوم النيوترونية الدوارة عالية التمغنـط (high magnetised spinning neutron stars) ، النجـوم النابضـة (pulsars) ، الثقوب السـوداء (black holes) و المـجرات ذات المراكـز النشـطة (active galactic nuclei) .

هناك آليتان مقترحتان لعملية التسريع ، أولاهما التسريع بالحقول الكهرطيسية والثانية تسمى آلية فيرمي :

- التسريع بالحقول الكهرطيسية

بما أن الأشعـة الكونية هي عبارة عن جسيمات مشحونة ، فان ابسط طريقة لتسريه هاته الجسيمات هي خضوعها لتأثير حقل كهربائي، إن التسريع بالحقـل الكهروستاتيكي أمر مستبعد لان بلـوغ طاقات من رتبة 10^{20} eV يتطلب فرقا في الجهد كبير جدا و لا يوجد أي جرم فلكي له القـدرة على توفيـر مثـل هذا الكمـون (فيما عدا و ربما النجوم النابضة $\Delta V \leq 10^{12}$-10^{13} V) و على العكس من ذلك تبدو آلية التسريع بالحقـول الكهربائية المتحرضة (تنشا عن الحقـول المغناطيسية الغيـر مستقرة) أكثـر واقعيـة فالحقول المغناطيسية موجودة في كل أنحاء الكون و تمتد على مسافات عملاقة ، يمكن لجسيـم شحنته Ze

إذا تحرك داخــل حقل شدته B **لمسافة قدرها** L **، أن يكتسب طاقة قيمتــها القصوى (الشكل** 1-15**) :**

$$E_{max} = \Gamma ZecBL$$

حيث Γ **يمثــل معــامــل لورنتــز للوســط المســرع .**

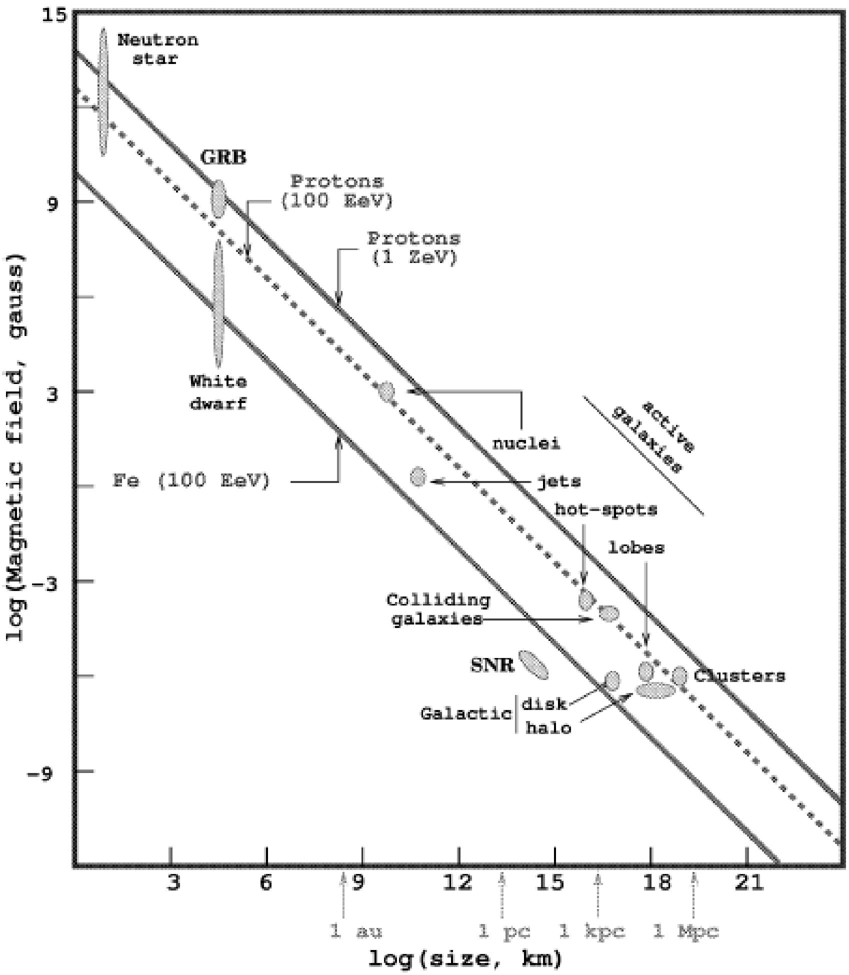
تعتبر النجوم النابضة و النجوم النيوترونية مصادر مثالية للحقول المتحرضة ، تبلغ قيمة الحقــل المغناطيسي على سطــح النجوم النابضة الحديثــة $B = 10^{12}$ G[15] **و هي تدور حول نفسها في زمن قدره** t =10 ms **فإذا كان محــور الدوران يميــل بزاوية ما عن محور الحقــل المغناطيسي فان هذا الجرم سيعطي ايضائيــة** (luminosity) **قــدرها** $L = 2\times10^{31}$ js^{-1} [16] **، وعليــه فان عــدد النجــوم النابضة المعروفة (متوسط عمر النجم النابــض هو** 10^{10} **سنــة**[15] **يعتبركاف جدا لتوفير الايضائيــة المقابــلة للأشعــةالكونيــة و التي تقــدر ب :** $L_{CR} = 10^{34}$ js^{-1} [16] **. كما أ ا توفــر طاقــات عاليــة تبلــغ القيــمة** 10^{20} eV**. الصعــوبة التي واجهت آليــة التسريع بالحقــول الكهرطيسية هي عــدم قدر ا على تفســير الطبيعــة الاسيــة للطيــف الطــاقــوي التفــاضــلي .**

- التسريع بآلية فيرمي Fermi acceleration mechanism

هاته الآليــة اقترحها فيرمي (Fermi**) سنة** 1949 **، تعتمد فكرة فيرمي على أن الجسيــمات تتسارع عندما تكتسب طاقة نتيجة تصادمها مع جسيمات أخرى ، يسمى النموذج الأول الذي اقترحه فيرمي بالتسريع من الرتبة الثانيــة** $\left[\left(u/v\right)^2\right]$ **حيث** u **هي سرعة السحابة المغناطيسية وفيه تتفاعل الجسيمات المشحونــة مع السحب المغناطيسية المنتشرة في الوسط البين- نجمي وتتبادل معها الطاقة ، تكتسب الجسيمات الطاقة عندما ترتد عند المناطق التي يكون فيها الحقــل المغناطيسي منحنيا (مفعول الزجاجة) ، وتخسر الجسيمات الطاقــة عندما ترتد تحت تأثيــر مفعول الجــدار، إن عدد الارتدادات بمفعول الزجاجة اكبر بكثيــر من عــدد الارتــدادات بمفعــول الجدار ، و هو ما يعطي ربــحا في الطــاقــة يعــطى بالصيــغة التالية :**

$$\frac{\Delta E}{E} = 2\frac{u^2}{v^2}$$

حيث v **هي سرعــة الجسيــم .**



الشكل 1- **15**

مخطط هيلاس Hillas **لبعض الأجرام السماوية .**

واجهت هذا النموذج عدة صعوبات أهمها أن الزمن اللازم لاكتساب الجسيمات قدرا من الطاقة مساو للقيم المعروفة لطاقة الأشعة الكونية طويل جدا لدرجة انه يفوق العمر النموذجي للأشعة الكونية ، إذ أن المسافات بين السحب المغناطيسية كبيرة جدا ،كما أن الجسيمات تفقد جزءا من طاقتها نتيجة عبورها الغبار المنتشر في الفضاء .

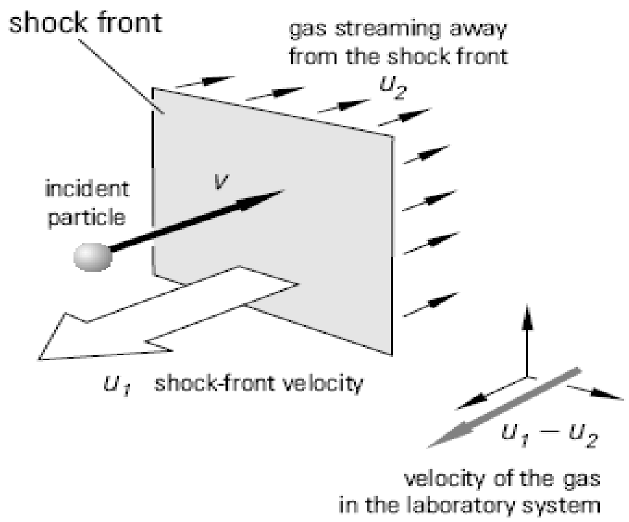
يسمى النموذج الثاني الذي يعتبر تحسين لنموذج فيرمي الأول بالتسريـع من الرتبـة الأولى و يعتـمد على فكرة التصادم بين الجسيمات وجبهة الموجـة (الشكل 16-1) ، تحدث موجة الصدمة (بسرعة V_S) عنـدما تتحـ ـرك المـادة في وسـ ـط ما بسرعـة (V_P) تفـوق سرعـة الصوت (V_{son}) في ذلك الوسـط (تبلغ سرعة السحب التي تقذفها السوبرنوفا في الوسط البين- نجمي حـوالي $V_P \approx 10^4\, km.s^-$ وتبلغ سرعة الصوت في الوسط البين- مجري $V_{son} \approx 10\, km.s^-$) [17]. يعطى الربح في الطاقة الحاصـل من موجـات الصدم بالعبارة :

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{4}{3}\frac{\Delta U}{c}$$

مع :

$$U_1 = V_S$$
$$U_2 = \left| V_P - V_S \right|$$

من محاسن هذا النموذج انه يفسر الطابع الاسي للطيف الطاقوي التفاضلي ، كما أن التسريع اته الآلية يمكن الجسيمات من بلوغ طاقة قدرها 10^{14} eV .



الشكل 16-1

مخطط لآلية التسريع بالموجات الصدمية .

1-8-2 النظرية الثانية top down

ترتكـز هاته النظرية على فرضيـة وجود جسيمات (X) عاليـة الكتلة $\left(m_X c^2 \approx 10^{25}\ \text{eV}\right)$، عنـدما تتفكك هاته الجسيـمات تعـطي الأشعـة الكونيـة عاليـة الطاقـة (extrem energy cosmic ray) .
وفقا لنظرية الانفجـار العظيـم (big bang) ، كان الكون في مرحلته الأولى (قبل حوالي 15مليار سنة) ذو كثافـة وحرارة عاليتين جدا ، وكانت كل القوى موحدة (GUT) ، يبدأ الكـون بالتوسع تحت تأثير كل من الضغط و الجاذبية إلى أن يبلغ المرحلة التي ينكسر فيها التناظر(تفكك القوى) نتيـجة للتشوهات التوبولوجية .
يتم إنتاج الجسيـمات عالية الكتلة في هاته المرحلة من تطور الكون و تفترض هاته النظرية أن يكون زمن حياة الجسيمات عالية الكتلة من نفس رتبة عمر الكون .

1-9 تأثير الحقل المغناطيسي الأرضي

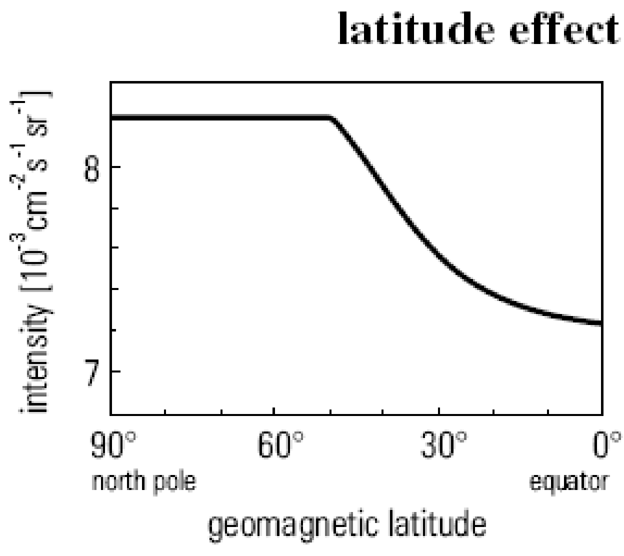
الأشعـة الكونيـة الابتدائيـة وكذلك أغلبية الأشعة الكونية الثانوية هي جسيمات مشحونة و عليه فان مسارا ا تتعرض للانحنـاء عندما تدخـل الحقل المغناطيسي الأرضي مما يؤدي إلى تغيير وجهتها نحو أماكن أخرى من الفضـاء و منعها بالتالي من بلوغ سطح الأرض . تسمى هاته الظاهرة بالقطع المغناطيسي و هي عدم قدرة الجسيمـات المشحونة التي تدخل الحقل المغناطيسي الأرضي على بلـوغ سطح الأرض إلا إذا كانت تمتلك على الأقل حـدا أدنى من العطالـة المغناطيسيـة (rigidity) أو الطاقة، تتعلق هاته القيـمة بمـوقـع و اتجـاه دخـول الجسيـم مجـال الأرض المغنـاطيـسي .

تتغير شدة الحقـل المغناطيسي الأرضي بين القطبين وخـط الاستواء و هذا يؤدي إلى تغير الحد الأدنى من العطالة و بالتالي كثافة الأشعة الكونيـة بتغير خط العرض ، لذلك يسمى هذا الارتبـاط مفعـول خـط العـرض (latitude effect) .
لوحظ أيضا أن كثافة الأشعة الكونية تتغير بالنسبة لخط عرض معين من نقطة إلى أخرى ويرجـع ذلك إلى عدم تمركز عزم ثنائي القطب المغناطيسي ، يسمى هذا التغير مفعـول خط الطول (longitude effect) .
إضافـة إلى مفعولي خط العرض وخط الطول هناك أيضا مفعـول الشرق-غرب (east-west) ، و يتمثل

في كون عـدد الجسيـمات المتحركة من الشرق نحو الغرب اكبربكثير من عـدد الجسيمات المتحركـة من الغرب نحو الشرق ، و يرجع ذلك لكـون الأغلبية العظمى من الأشعـة الكونيـة الابتدائيـة عبارة عن بروتونات .

1-9-1 مفعول خط العرض latitude effect

إن مفعول خـط العرض هو نتيجة مباشرة لعملية القطع المغناطيسي ، حيث تتعلق قيمة طاقة القطع بشدة الحقل المغناطيسي ، وبما أن شدة الحقل تتغير من خط عرض لآخر، فان طاقة القطـع تتعلق بخـط العرض الذي يدخل منه الجسيم مجال الأرض المغناطيسي . تتطلب مثلا البروتونات الابتدائية التي ترد إلى الأرض عند المستـوى الاستوائي و بشكـل عمودي طاقـة أعلى من 15 GeV كي تبلـغ سطح الأرض بينما تحتاج فقط إلى 2.7 GeV عند خط العرض 50^0 ، يبين هـذا المثال أن تدفق (كثافة) الأشعـة الكونيـة يزداد باتجاه القطبين . إن التغير في التدفق (الكثافة) بدلالة خـط العرض لا يستمر حتى بلوغ القطبين بل يتوقف عند خـط عرض معين مشكلا ما يسمى الركبـة knee (الشكل17-1) . تظهر الركبة بالنسبة للميـونات عنـد خـط العرض 40^0 ، و تظهـر بالنسبـة للنوكلـونات عند خـط العرض 55^0 .



الشكل 17-1

مفعـول خـط العـرض .

درجة خط العرض	0	41	50	58
طاقة القطع العمودية (GeV)	15	5	2.7	1.4
تدفق البروتونات $(cm^{-2}s^{-}sr^{-})$	2.8×10^{-2}	7.3×10^{-2}	18×10^{-2}	29×10^{-2}

الجدول 1-1

مفعول خط العرض بالنسبة للبروتونات الابتدائية .

2-9-1 المفعول شرق - غرب east-west effect

عندما تم **قياس تدفـق الجسيمات عند نقطة تصنع زاوية قطبية** θ **، و زاوية استوائيـة** φ **، وجـد أن التدفـق من ناحية الشمـال** $I_n(\theta)$ **و التدفـق من ناحية الجنوب** $I_s(\theta)$ **متساويان ،** في حين **وجـد أن التدفـق من ناحية الغرب** $I_w(\theta)$ **اكبر من التدفق من ناحية الشرق** $I_e(\theta)$ **،** سميت **هاته الظاهرة بالمفعول شـرق - غـرب .**

فسر المفعول شرق - غرب بكون طاقة القطع المغناطيسي تتعلق بزاوية الورود ، فطاقة القطع المغناطيسي مثلا عند خـط الاستـواء بالنسبة للجسيـمات الواردة من الشـرق هي 60 GeV **بينما لا تتجـاوز أل** 10 GeV **بالنسبة للجسيمـات الواردة من الغرب ، وعليه فان القسم الأكبـر من الطيف الأتـي من الشرق يتم اعتـراضـه .**

يتعلق المفعـول شرق - غرب بكل من الزاوية القطبيـة θ **، الارتفـاع** h **ودرجـة خط العرض** λ **، كما انه يتأثر بعامل آخر و هو** سماكـة **الغلاف الجوي، تتناقص** سماكة **الغلاف الجوي كلما توجهنا** نحو القطبين

ما يعني زيادة كثافة المادة ، التي تؤدي إلى زيادة الفقـد (زيادة عامـل التخامد) . ينتج عن هذا العامل اختفاء المفعول شرق-غرب عند خـط العرض$(\approx 60^0)$. بعد هذا الخـط تكون كل الجسيمات الواردة من الغرب ذات الطاقات الضعيـفة (هاته الجسيمات هي المسببة للمفعول شرق- غرب) قـد اختفت .

يـوصـف المفعـول شـرق-غـرب بـدلالـة التـابـع التـالي :

$$\varepsilon = \frac{I_w(\theta) - I_e(\theta)}{\frac{1}{2}\left(I_w(\theta) + I_e(\theta)\right)} = \varepsilon(\theta., \lambda, h)$$

و هو يمتلك الخصائص التالية :

$h_2 > h_1$ **من اجل** $\varepsilon(h_2) > \varepsilon(h_1)$

$\theta_2 > \theta_1$ **من اجل** $\varepsilon(\theta_2) > \varepsilon(\theta_1)$

$\lambda_2 > \lambda_1$ **من اجل** $\varepsilon(\lambda_2) < \varepsilon(\lambda_1)$

درجة العرض	0	20	30	50
اللاتناظر $\varepsilon(\lambda)$	0.15	0.07	0.05	0.02

الجدول 2-1

هذا الجدول يبين تغيرات المفعول شرق-غرب بدلالة درجة خط العرض عند مستوى سطح البحر و زاوية ($\theta \equiv 60^0$) .

الفصـل الثـــاني

ديناميكا الجسيمات المشحونة في الحقـول المغناطيسيــــة

هذا الفصل يتعرض لحركـة الجسيمات المشحونـة في الحقول المغناطيسية وهـو مقسم إلى أربعة بنـود البنـد الأول يعالج الحركة في حقل مغناطيسي كيفي أي انه لا يملك شكـلا محـددا و يوضح الخصائص العامـة للحركة في الحقول المغناطيسية . البنـد الثاني يعالج الحركة في الحقل المغناطيسي الناشئ عن ثنائي القطب المغناطيسي نظرا لكون الحقل المغناطيـسي الأرضي يشبـه إلى حـد كبير حقـل ثنـائي القطب المغنـاطيـسي ، حيث يتم أيجاد معادلة الحركة انطلاقا من الحل التحليلي لمعادلة لورنتز و من ثم أيجـاد المناطق المسموحـة و المناطق المحرمة حركيا . البند الثالث هو تطبيق للنتائج المتحصل عليها في البند الثاني على حقـل الأرض المغناطيسي وذلك باعتباره بتقريب أولي مشا ا تماما لحقـل ثنائي القطب المغناطيسي و سنحدد في هاته الفقرة وعلى وجه الخصوص قيم القطع المغناطيسي . البند الرابع يتعرض للحل العددي لمعادلة لورنتز و رسم المسارات .

2-1 الحركة في حقل مغناطيسي كيفي

2-1-1 معادلات الحركة

إذا دخل جسيم شحنته q و سرعته $\mathbf{v}$ ، حقلا مغناطيسيا شدته B فانه يتعرض إلى قوة مغناطيسية تعطـى بالصيغة التالية ، والتي تسمى قوة لورنتز (Lorentz) :

$$\mathbf{F} = q\,(\mathbf{v}\times\mathbf{B}) \qquad (1\text{-}2)$$

و هي قوة عمودية على كل من شعاع الحقـل المغناطيسي و السرعـة ، و مثل هاته القـوة لا يغير من قيمة السرعة وإنما يغير فقط اتجاهها . بالنسبة للجسيمات النسبوية (عالية السرعة مقارنة بسرعة الضوء) يكـون تأثير القوة على النحو التالي :

$$\mathbf{F} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{p}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{d}(m\gamma\mathbf{v})}{\mathrm{dt}} = m\frac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{dt}}\mathbf{v} + m\gamma\frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{dt}} \qquad (2-2)$$

مع :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

و m **هي كتلة السكون .**

يمكــن إثبات أن المقاديــر v **،** γ **و** p **ثابتــة ، و ذلك على النحــو التالي :**

$$\frac{\mathrm{d}(\mathbf{p}^2)}{\mathrm{d}\mathbf{t}} = 2\mathbf{p}\frac{\mathbf{dp}}{\mathbf{dt}} = 2q\,\mathbf{p}\cdot(\mathbf{v}\times\mathbf{B}) = 0$$

و عليه فان المعادلة (2-1) **تصبح :**

$$m\gamma\frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{dt}} = q(\mathbf{v}\times\mathbf{B}) \qquad (3-2)$$

سنقوم بحل هاته المعادلة في نظام الإحداثيات الكروية ، شعاع الموضع في هاته الإحداثيات هو :

$$\mathbf{r} = r\,\mathbf{e_r}$$

شعاع السرعة :

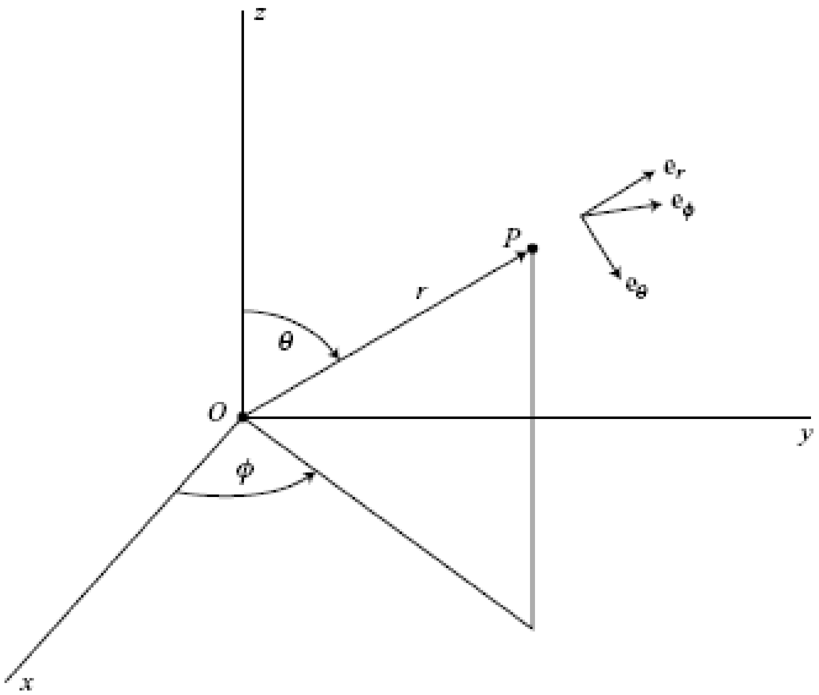
$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{r}} = \dot{r}\,\mathbf{e_r} + r\,\dot{\theta}\mathbf{e}_\theta + r\,\dot{\phi}\,sin\,\theta\mathbf{e}_\phi \qquad (4-2)$$

شعاع التسارع :

$$\mathbf{a} = \dot{\mathbf{v}} = \left(\ddot{r} - r\,\dot{\theta}^2 - r\,\dot{\phi}^2\,sin^2\,\theta\right)\mathbf{e_r} + \left(r\,\ddot{\theta} + 2\,\dot{r}\,\dot{\theta} - r\,\dot{\phi}^2\,sin\,\theta\,cos\,\theta\right)\mathbf{e}_\theta$$
$$+\left(r\,\ddot{\phi}\,sin\,\theta + 2\,\dot{r}\,\dot{\phi}\,sin\,\theta + 2\,r\,\dot{\theta}\dot{\phi}\,cos\,\theta\right)\mathbf{e}_\phi \qquad (5-2)$$

و بالأخذ بالاعتبار مركبات الحقل المغناطيسي :

$$\mathbf{B} = B_\mathrm{r}\,\mathbf{e_r} + B_\phi\,\mathbf{e}_\phi + B_\theta\,\mathbf{e}_\theta$$



الشكل 1-2

نظام الإحداثيات الكروية .

نجد مايلي :

$$m\gamma\left(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - r\dot{\phi}^2 \sin^2\theta\right) = q\left(B_\phi r\dot{\theta} - B_\theta r\dot{\phi}\sin\theta\right) \qquad (6-2)$$

$$m\gamma\left(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} - r\dot{\phi}^2 \sin\theta\cos\theta\right) = q\left(B_r r\dot{\phi}\sin\theta - B_\phi \dot{r}\right) \qquad (8-2)$$

$$m\gamma\left(r\ddot{\phi}\sin\theta + 2\dot{r}\dot{\phi}\sin\theta + 2r\dot{\theta}\dot{\phi}\cos\theta\right) = q\left(B_\theta \dot{r} - B_r r\dot{\theta}\right) \qquad (7-2)$$

2-1-2 حالات خاصة

- الحقـل المنتظم : عندما يكون الحقل المغناطيسي منتظما فان حركة الجسيم هي بصفة عامة عبـارة عن حركة لولبيـة ، أي تركيب حركتين إحداهما دائريـة حول مركز الدوران (نقطة من خط الحقل) بنصف قطر يسمى نصف قطر لارمور(Larmor) :

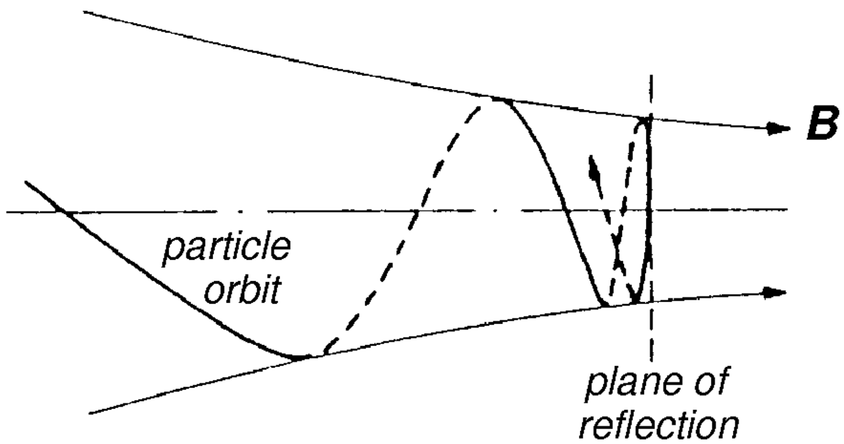
$$r_c = \frac{m\gamma}{qB} v_{\perp}$$

حيث $v_{\perp}$ **هي مركبـة السرعـة وفق الاتجـاه العمودي على شعاع الحقـل المغناطيسي ، أما الحركـة الثانية فهي انسحابية بموازاة خطوط الحقل .**

- الحقـل المتغير باتجاه خطوط الطول $\vec{\nabla} B$ **: إذا كانت شـدة الحقل المغناطيسي B تتغير باتجاه خطـوط الحقل ، أي انه كلما تحركنا بموازاة خطوط الحقل كلما تغيرت شـدة الحقل فان الجسيم سيتأثر بقوةأخرى اتجاهها بموازاة خطوط الحقل ونقطة تأثيرها هي مركز الدوران ، إذا كان معـدل التغير في شـدة الحقـل ضعيف فان القوة الناشئة عن ذلك تعطى بالعبارة التالية [1] :**

$$\mathbf{F} = -\frac{1}{2}\frac{m\gamma}{B} v_{\perp}^{2}.\vec{\nabla} B$$

إذا كانت شدة الحقل المغناطيسي تتغير بحيث تزداد باتجاه معين فان الجسيم يمكن أن يعكس اتجاه حركتـه تحت تأثير هاته القوة و يسمى هذا التأثير بمفعـول المرآة (الشكل 2-2) ، أما إذا امتلك الحقـل قيمتين عظمتين في نقطتين مختلفتين فان الجسيم سيتـم أسره داخل المنطقة المحصورة بين هاتين النقطتين .



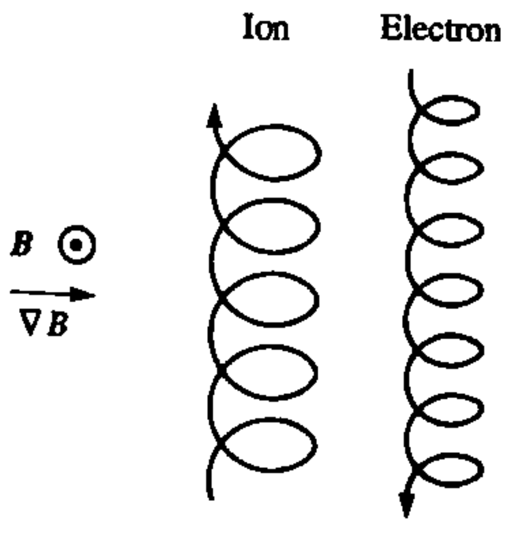
الشكل 2-2

الارتداد نتيجة التدرج باتجاه خطوط الحقل .

- الحقل المتغير عموديا على خطوط الطول $\vec{\nabla}_{\perp}B$: إذا كانت شـدة الحقل المغناطيسي تتغير في الاتجـاه العمـودي على خطوط الحقل المغناطيسي فان الجسيم المتحرك في هذا الحقل سيتأثر بقـوة أخرى ناتجـة عن التغير في شدة الحقل ، يقع محور هاته القـوة في المستوي العمودي على المستوي الذي يشمل كل من **B** و $\vec{\nabla}$**B** ، وتعطى بالعبارة التالية :

$$\mathbf{F} = \frac{1}{q}\frac{\mathbf{F}_{\perp} \times \mathbf{B}}{B^2}$$

حيث $\mathbf{F}_{\perp}$ هي مركبة القوة وفق الاتجاه العمودي على شعاع الحقل المغناطيسي . تقوم هاته القوة بتحريك الجسيم في اتجاه عمودي على خطوط الحقل ، بسرعة تسمى سرعة الجر، تتعلق القـوة بشحنة الجسـيم و عليه فان اتـجاه الانسحاب (الجر) للشحنات المختلفة يكون متعاكسا (الشكل 2-3) .



الشكل 2-3

تأثير الحقل المتغير باتجاه عمودي على خطوط الحقل .

- الحقـل ذو الخطوط المنحنية : إذا كانت خطوط الحقل المغناطيسي منحنية وكان نصف قطر الانحنـاء هو R **(الشكل** 4-2**) ، فان الجسيـم المتحرك في هذا الحقل سيخضـع لتأثيرين إضافيين ، أولهما تأثير قوة الطرد المركـزي الناتجـة من انحناء مسـار مركز الدوران و هي قوة مركزيـة** F_c **، ينتج عنها حركـة انسحابية بسرعـة**[1] **:**

$$\mathbf{v}_{D1} = \frac{1}{q}\frac{\mathbf{F}_C \times \mathbf{B}}{B^2} = \frac{m\gamma \upsilon_{II}^{\ 2}}{q}\frac{\mathbf{R}\times\mathbf{B}}{R^2\,B^2}$$

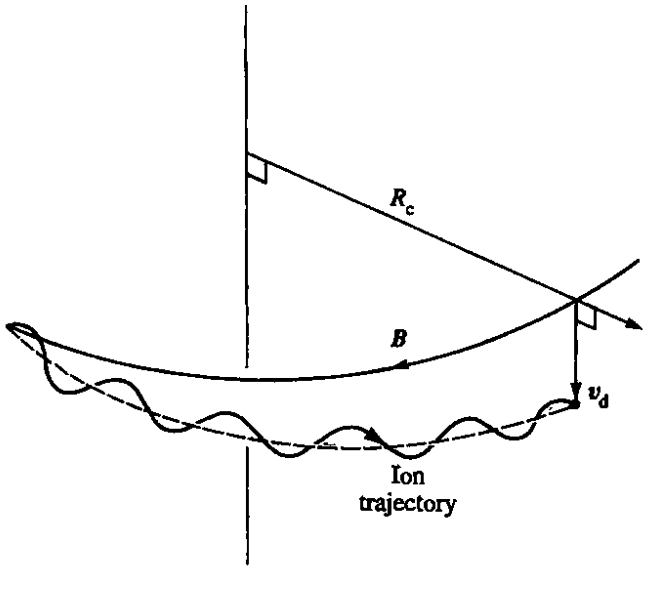
التأثـير الثاني يرجـع إلى القـوة الناتجـة عن التغير القطري (عمودي على خطوط الحقـل) في شـدة الحقـل المغناطيسي ، ينشا عن هاته القـوة أيضا حركته انسحابيـة بسرعـة :

$$\mathbf{v}_{D2} = \frac{m\gamma\, v_{\perp}^2}{2B^2\, q}\frac{\mathbf{R}\times\mathbf{B}}{R^2}$$

و عليه فان سرعة الانسحاب (الجر) الكلية هي :

$$\mathbf{V}_{D} = \mathbf{v}_{D1} + \mathbf{v}_{D2} = \frac{m\gamma}{q}\frac{\mathbf{R}\times\mathbf{B}}{R^2\,B^2}\left[\mathbf{v}_{//}^2 + \tfrac{1}{2}\mathbf{v}_{\perp}^2\right]$$

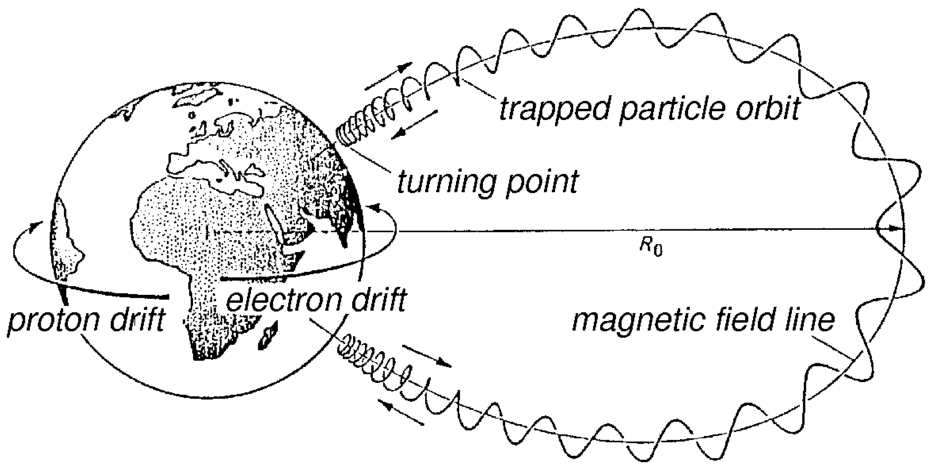
حيث $v_{//}$ **هي مركبة السرعة وفق الاتجاه الموازي لشعاع الحقل المغناطيسي .**



الشكل 4-2

انسحاب مركز الدوران نتيجة انحناء خطوط الحقل .

يعتبر الحقل المغناطيسي الأرضي مثالا جيدا لحقل يمتلك معظم الخصائص المذكورة أعلاه ، و لذلك فان بعض الجسيمات يتم أسرها داخل هذا الحقل متبعة مسارا كالموضح بالشكل 2-5 .



الشكل 2-5
تأثيـر كل من انحناء خطـوط الحقل و التدرج باتجـاه الخطوط على مسار الجسيم في الحقل المغناطيسي الأرضي(جسيم مأسور) .

2-2 الحركة في حقل ثنائي القطب المغناطيسي

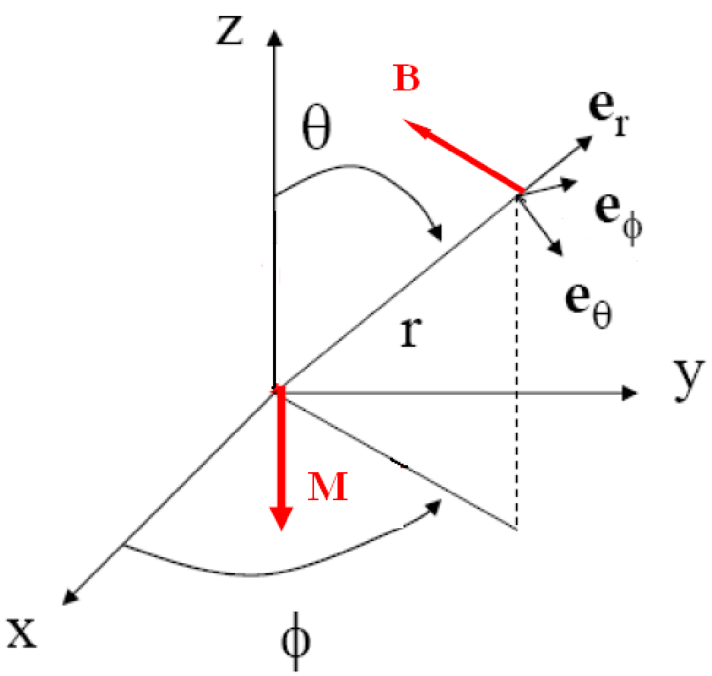
تعطى مركبات الحقل المغناطيسي الناشئ عن ثنائي القطب المغناطيسي ، في نظام الإحداثيـات الكروية بالعبارات التالية :

$$B_r = -\frac{2\mu_0 M}{4\pi r^3}\cos\theta$$

$$B_\theta = -\frac{\mu_0 M}{4\pi r^3}\sin\theta$$

$$B_\phi = 0$$

حيث M هو العــزم المغناطيســي (اتجاهه في هاته الحالة عكس اتجاه المحور OZ) .



الشكل 2-6
حقل ثنائي القطب المغناطيسي .

بالتعويــض عن B_r ، B_θ و B_Φ في المعــادلات (2-6 ، 2-7 ، 2-8) نحصــل على المعــادلات التفاضلية لحركة جسيم في حقل ثنائي القطب المغناطيسي و هي :

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - r\dot{\phi}^2 \sin^2\theta = \frac{\mu_0 qM}{4\pi . m\gamma}\frac{1}{r^2}\dot{\phi}\sin^2\theta \qquad (9-2)$$

$$r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} - r\dot{\phi}^2 \sin\theta\cos\theta = -\frac{2\mu_0 qM}{4\pi . m\gamma}\frac{1}{r^2}\dot{\phi}\sin\theta\cos\theta \qquad (10-2)$$

$$r\ddot{\phi}\sin\theta + 2\dot{r}\dot{\phi}\sin\theta + 2r\dot{\theta}\dot{\phi}\cos\theta = -\frac{\mu_0 qM}{4\pi . m\gamma}\left(\frac{\dot{r}\sin\theta}{r^3} - \frac{2\dot{\theta}\cos\theta}{r^2}\right) \qquad (11-2)$$

يمكـن الحصـول على معادلـة أخرى انطلاقـا من كـون سرعـة الجسيـم ثابتـة المقـدار:

$$\mathbf{v}^2 = \mathbf{const} = \dot{r}^2 + r^2\,\dot{\theta}^2 + r^2\,\dot{\phi}^2\,sin^2\,\theta = v_0^2 \qquad (12-2)$$

بحل جملة هاته المعادلات نحصل على معادلة المسار، و لأجل ذلك ندخل المتغيرات الجديدة التالية :

$$s = \frac{\upsilon}{l}t$$

$$\rho = \frac{r}{l}$$

$$\xi = \frac{q}{|q|}$$

مع

$$l = \sqrt{\frac{\mu_0 |q| M}{4\pi m\gamma\upsilon}}$$

يسمى هذا المقدار طول ستورمر stormer **و عليه :**

$$\phi' = \frac{d\phi}{ds}$$

$$\dot{\phi} = \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}s}\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = \frac{v}{l}\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}s} = \frac{v}{l}\phi'$$

$$\theta' = \frac{d\theta}{ds}$$

$$\dot{\theta} = \frac{v}{l}\theta'$$

$$\dot{\rho} = \frac{v}{l}\rho'$$

و علية تأخـذ جملـة المعـادلات (2-9 ، 2-10 ، 2-11 **) الشكـل التـالي:**

$$\rho'' - \rho\theta'^2 - \rho\phi'^2 \sin^2\theta = \frac{\xi}{\rho^2}\phi' \sin^2\theta \qquad (13-2)$$

$$\rho\theta'' + 2\rho'\theta' - \rho\phi'^2 \sin\theta\cos\theta = -2\xi\frac{1}{\rho^2}\phi'\sin\theta\cos\theta \qquad (14-2)$$

$$\rho\phi''\sin\theta + 2\rho'\phi'\sin\theta + 2\rho\theta'\phi'\cos\theta = -\xi\left(\frac{\rho'\sin\theta}{\rho^3} - \frac{2\theta'\cos\theta}{\rho^2}\right) \qquad (15-2)$$

و المعادلة (2- 12 **) تصبح :**

$$\rho'^2 + \rho^2\theta'^2 + \rho^2\phi'^2\sin^2\theta = 1 \qquad (16-2)$$

نضـرب طرفي المعادلـة (15-2) ب $\rho\sin\theta$ فنحصل على المعادلة التالية :

$$\frac{d}{ds}\left(\rho^2\phi'\sin^2\theta\right)=\xi\frac{d}{ds}\left(\frac{\sin^2\theta}{\rho}\right)$$

بالمكاملة نحصل على مايلي :

$$\rho^2\phi'\sin^2\theta-\xi\frac{\sin^2\theta}{\rho}-2\alpha=0 \qquad (17-2)$$

يمثـل 2α ثـابت المكاملـة ، يعـطى هـذا الثـابـت ب :

$$2\alpha=\frac{1}{l}\frac{p_\phi}{p}$$

لإثبات ذلك ننطلق من عبارة اللاغرانجي النسبـوي $[2-3]$:

$$L=-m\mathbf{c}^2\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{\mathbf{c}^2}}+q\,\mathbf{A}.\mathbf{v}$$
$$\mathbf{A}=-\frac{\mu_0\,M\,.sin\,\theta}{4\pi.r^2}\mathbf{e}_\phi$$
$$L=-m\mathbf{c}^2\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{\mathbf{c}^2}}-\frac{\mu_0\,M}{4\pi.}\frac{sin^2\theta}{r}\dot{\phi}$$

نلاحظ أن اللاغرانجي لا يحتوي صراحة على المتغير ϕ أي أن :

$$\frac{\partial L}{\partial\phi}=0$$

وعليـه و انطـلاقـا من معـادلـة ايلـر- لاغـرانـج :

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial\ell}{\partial\dot{\phi}}-\frac{\partial L}{\partial\phi}=0$$

نجد أن :

$$p_\phi = \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} = \mathbf{const}$$

أي أن p_Φ يمثـل ثابـت حـركـة .

$$p_\phi = \frac{\partial \ell}{\partial \dot{\phi}} = \frac{\partial}{\partial v}(-m\mathbf{c}^2\sqrt{1-\frac{\upsilon^2}{\mathbf{c}^2}})\frac{\partial v}{\partial \dot{\phi}} - \frac{\mu_0 M}{4\pi}\frac{sin^2\theta}{r}$$

$$p_\phi = \frac{r^2\, sin^2\theta\,\dot{\phi}}{v} - \frac{\mu_0 M}{4\pi\, m\gamma\, v}\frac{sin^2\theta}{r}$$

باخـذ التعويضـات الـلازمـة نحصـل على :

$$p_\phi = lp(\ \rho^2\phi'\, sin^2\theta - \xi\frac{sin^2\theta}{\rho}\ \ )$$

و منه :

$$2\alpha = \frac{p_\phi}{lp}$$

و من اجل توضيح معنى هذا الثابت نأخذ الحركة في المستوى الاستـوائي ($\theta = \frac{\pi}{2}$) كما بالشكل (2-7) و ندخل الزاوية شرق-غرب كمايلي :

$$\mathbf{v}\cdot\mathbf{e}_\phi = v\,sin\,\eta = r\,\dot{\phi}\,sin\,\theta \qquad (19-2)$$

ندخـل أيضا الزاوية $\lambda = \frac{\pi}{2} - \theta$ التي تمثل درجة خط العرض (الشكل 2-8) ، حيث :

$$\lambda \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$$

نعوض في المعادلة (2-17) ونعيد كتابتها بدلالة r فنجد :

$$2\alpha = \ r\,cos\,\lambda.sin\,\eta - \frac{\mu_0}{R}\frac{cos^2\lambda}{r}$$

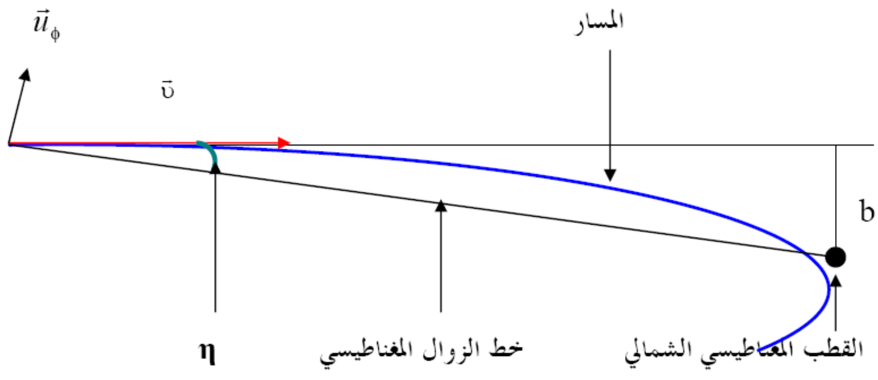
حيث R **هي العطالة المغناطيسية (تقاس بالفولت** V**) :**

$$R = \frac{\mathbf{c}\, m\gamma v}{|q|}$$

بأخذ النهاية :

$$\lim_{r\to\infty}(2\alpha) = r\sin\eta = b \qquad (\cos\lambda = 1)$$

أي أن ثابت المكاملـة 2α **يتطابـق مع تعريـف وسيط الصـدم** [2] b **.**



الشكل 2-7

تعريـف الزاويـة شـرق- غـرب η **و هـي**

الزاوية بين اتجاه الجسيم و مستوى الزوال المغناطيسي

انطلاقا من المعادلتين (2-16**) و (**2-17**) نحصل على الشرط التالي :**

$$-1 \le \left[\xi\frac{\sin\theta}{\rho^2} + \frac{2\alpha}{\rho\sin\theta}\right] \le +1 \qquad (18-2)$$

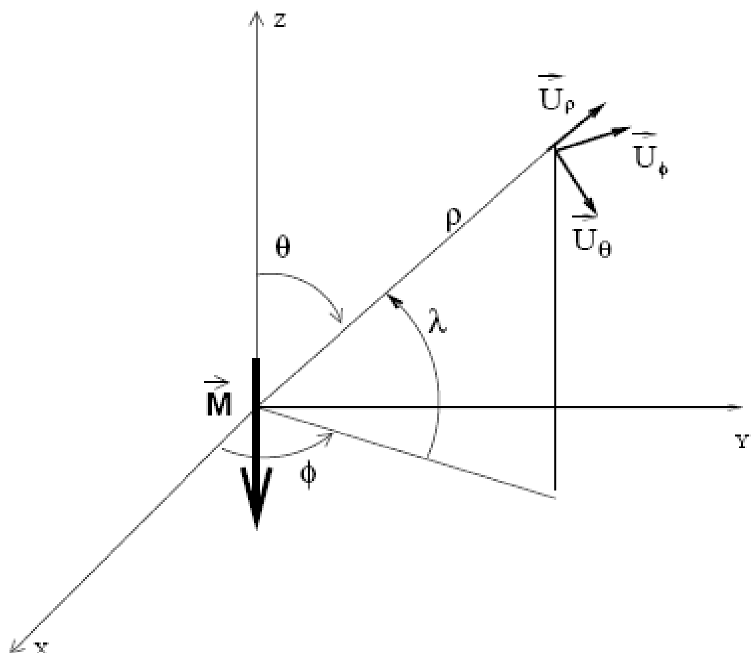
نعيد كتابة المعادلة (2-17**) بدلالة الزاويتين** η **و** λ **:**

$$\rho^2 \cos\lambda.\sin\eta - 2\alpha.\rho - \xi.\cos^2\lambda = 0 \qquad (20-2)$$

و هي معادلة من الدرجة الثانية في المتغير القطري ، حلول هاته المعادلة تعطي معادلة المســار :

$$\rho_+ = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \xi\cos^3\lambda\sin\eta}}{\cos\lambda\sin\eta} \qquad (21-2)$$

$$\rho_- = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 + \xi\cos^3\lambda\sin\eta}}{\cos\lambda\sin\eta} \qquad (22-2)$$



الشكل 8-2

تعريف الزاوية λ (درجة خط العرض) .

يتم تحديد المناطق التي يتحرك فيها الجسيم انطلاقا من الشرط (2-18) على النحو التالي :

$$\cos\lambda\rho^2 - 2\alpha\rho - \xi\cos^2\lambda \geq 0 \qquad (1)$$

$$\cos\lambda\rho^2 + 2\alpha\rho + \xi\cos^2\lambda \geq 0 \qquad (2)$$

للتبسيـط نعتبر جسيما موجب الشحنـة ، المتراجحـة الأولى (1) تتحقـق كمايلي :
المميز هو :

$$\Delta 1 = 4(\alpha^2 + \cos^3\lambda)$$

الاصفار هي :

$$\rho_{11} = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 + \cos^3\lambda}}{\cos\lambda} \qquad (23-2)$$

$$\rho_{12} = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \cos^3\lambda}}{\cos\lambda} \qquad (24-2)$$

إن المميز $\Delta 1$ موجب على الدوام لان $\cos\lambda > 0$ ، و عليه فان المتراجحة (1) محققـة دوما خارج الاصفار
(الجذور) أي :

$$\rho \in [0, \rho_{11}] \cup [\rho_{12}, \infty[$$

المتراجحة (2) تتحقق وفقا للشروط التي يفرضها المميز :

$$\Delta 2 = 4\left(\alpha^2 - \cos^3\lambda\right)$$

أصفار المعادلة (2) **هي :**

$$\rho_{21} = \frac{-\alpha - \sqrt{\alpha^2 - cos^3 \lambda}}{cos \lambda} \qquad (25-2)$$

$$\rho_{22} = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 - cos^3 \lambda}}{cos \lambda} \qquad (26-2)$$

إذا كان المميز موجبا فان المتراجحة (2) **تتحقق خارج الاصفارفقـط وإذا كان المميز سالبا فان المتراجحة تتحقـق من اجل كل قيـم** ρ **، تتعلـق إشـارة المميز بالثابت** α **وبشكـل استـلزامي بالزاويـة** λ**. وعليـه فان المناطق التي يتحرك فيها الجسيـم تتعلق بشكل أساسي بقيمة الثابت** α **، وهو ما يدفـع إلى التمييـز بين الحالات المختلفـة التاليـة :**

أ_ $\alpha < -1$ **: في هاته الحالة يكون** ρ_{11} **سالب ، و يكون** $\rho_{22} > \rho_{21} > \rho_{12}$ **وعليـه فانه هناك منطقتين مسموحتيـن حركيا (الشكل** 2-9**) ، تفصل بين هاتين المنطقتين منطقة ممنوعـة حركيا ،تمتد المنطقة الأولى المسموحة حركيا (المنطقة** A**) من السطح** ρ_{12} **إلى غاية السطح** ρ_{21} **(جسيمات محتجزة) . مع ملاحظة أن**

$$\rho_{12} = \rho_{+}(sin\,\eta = 1)$$

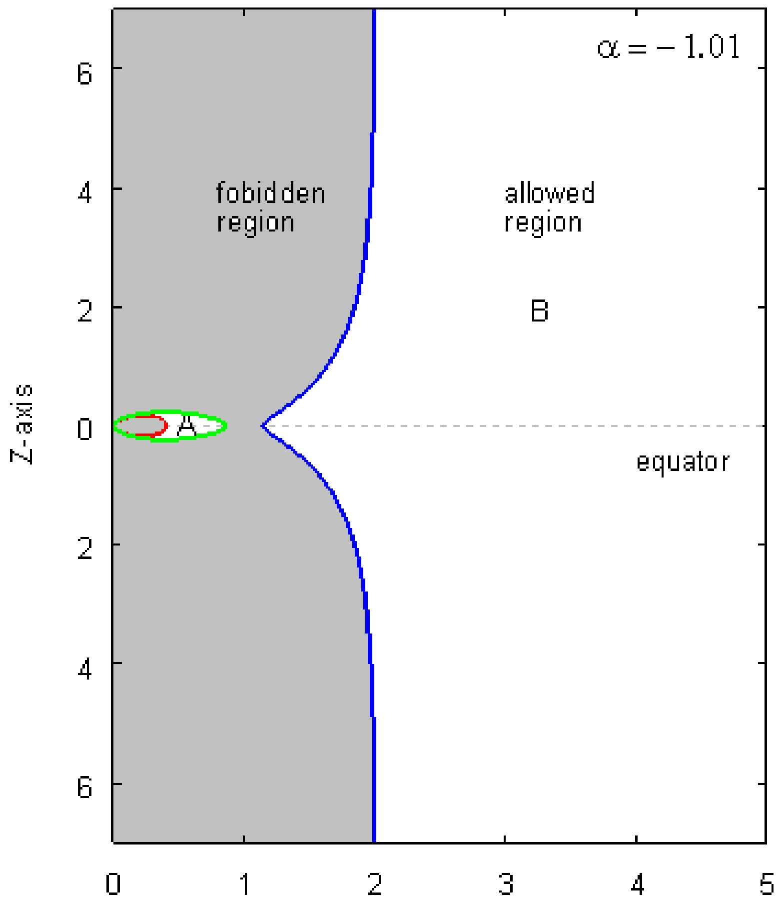
$$\rho_{21} = \rho_{+}(sin\,\eta = -1)$$

و هو ما يعني أن الحركة في هاته المنطقة تحكمها المعادلة (2-21**) . أما المنطقة الثانية المسموحة حركيا فهي تمتـد من السطح** ρ_{22} **إلى ما لا نهاية (المنطقة** B**) ، مع ملاحـظة أن :**

$$\rho_{22} = \rho_{-}(sin\,\eta = -1)$$

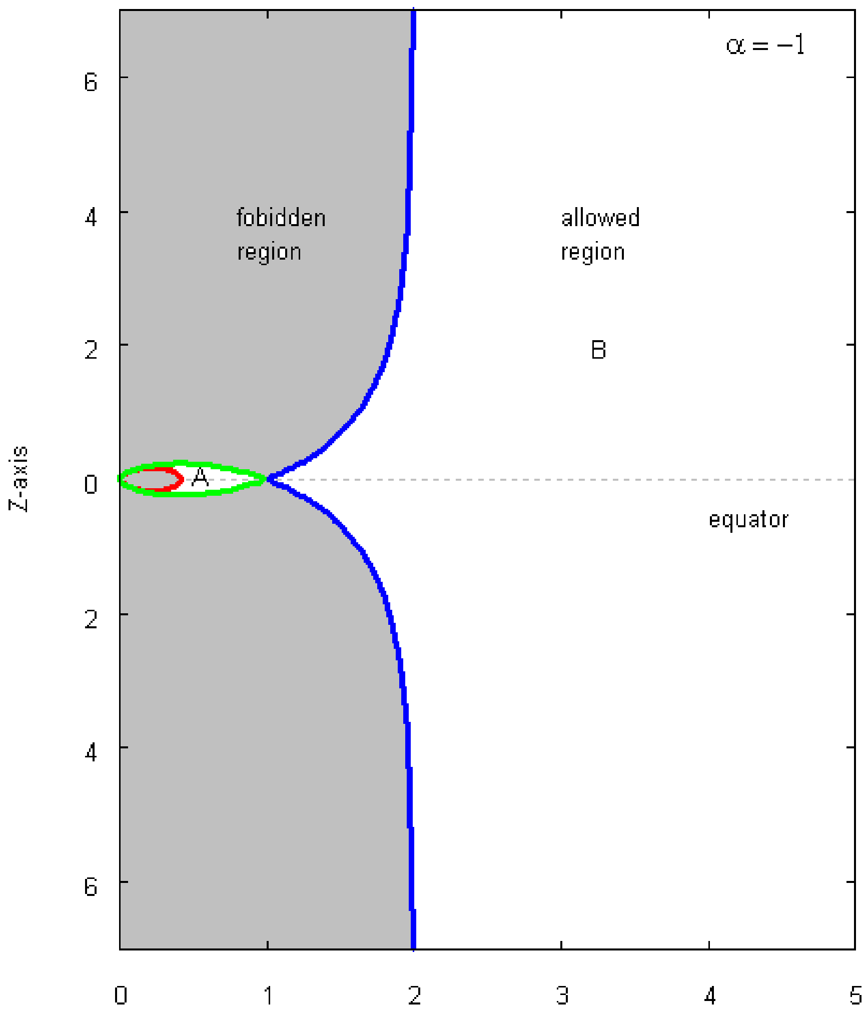
أي أن الحركة في هاته المنطقة تحكمها المعادلة (2-22**) . تمثل جسيمات المنطقة** B **جسيمات كونية و هي لا تستطيع أبدا أن تخترق المنطقة المحظورة التي تفصلها عن المنطقة** A **مهما كانت طاقتها** [2] **، أما جسيمات المنطقة** A **فهي جسيمات محليـة و هي الأخرى لا يمكنـها أبدا أن تغادر هاته المنطقة . نلاحظ أن أقصى**

اتساع للمنطقة A **يكون من اجل** $\rho = 1$ **.**



الشكل 2-9

التمثيل في الإحداثيات القطبية للمناطق المسموحة حركيا A **و** B **(الغير مضللة) أما المناطق المظللة فهي مناطق محظورة .**



الشكل 2-10

تلتحم المنطقتان المسموحتان حركيا من اجل $\alpha = -1$.

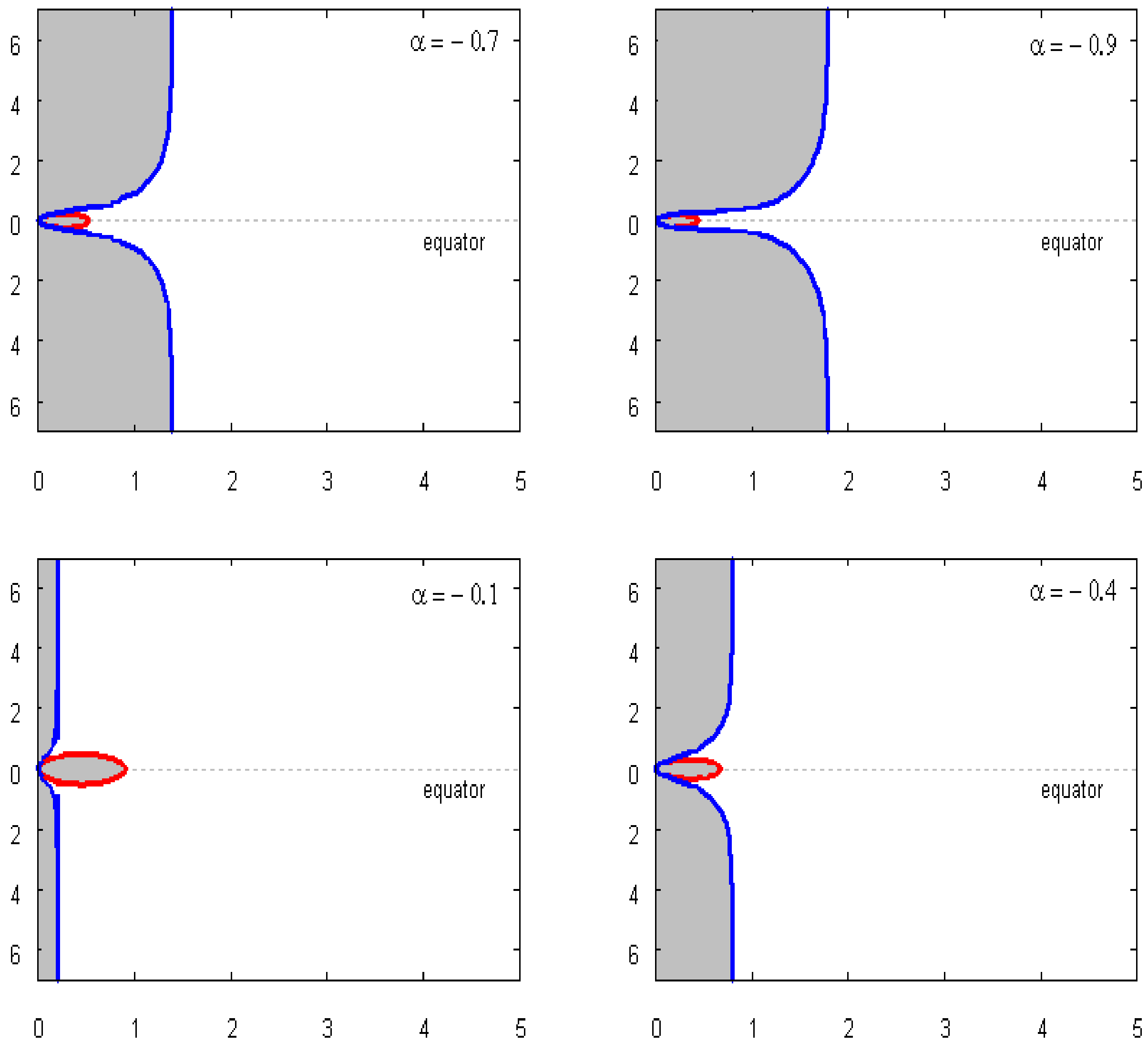
ج ــ $-1 < \alpha < 0$ **: في هاته الحالة سيظهر شرط جديد يقيد قيم الزاويــة** λ **، والحركة مسموحة فقط في المناطق التالية :**

$$\lambda \in \left[-\frac{\pi}{2} , -\arccos(\alpha^{\frac{2}{3}}) \right] \cup \left[\arccos(\alpha^{\frac{2}{3}}) , \frac{\pi}{2} \right]$$

$$\rho \in [\rho_{12} , \rho_{21}] \cup [\rho_{22} , \infty [$$

$$\lambda \in \left[-\arccos(\alpha^{\frac{2}{3}}) , \arccos(\alpha^{\frac{2}{3}}) \right]$$

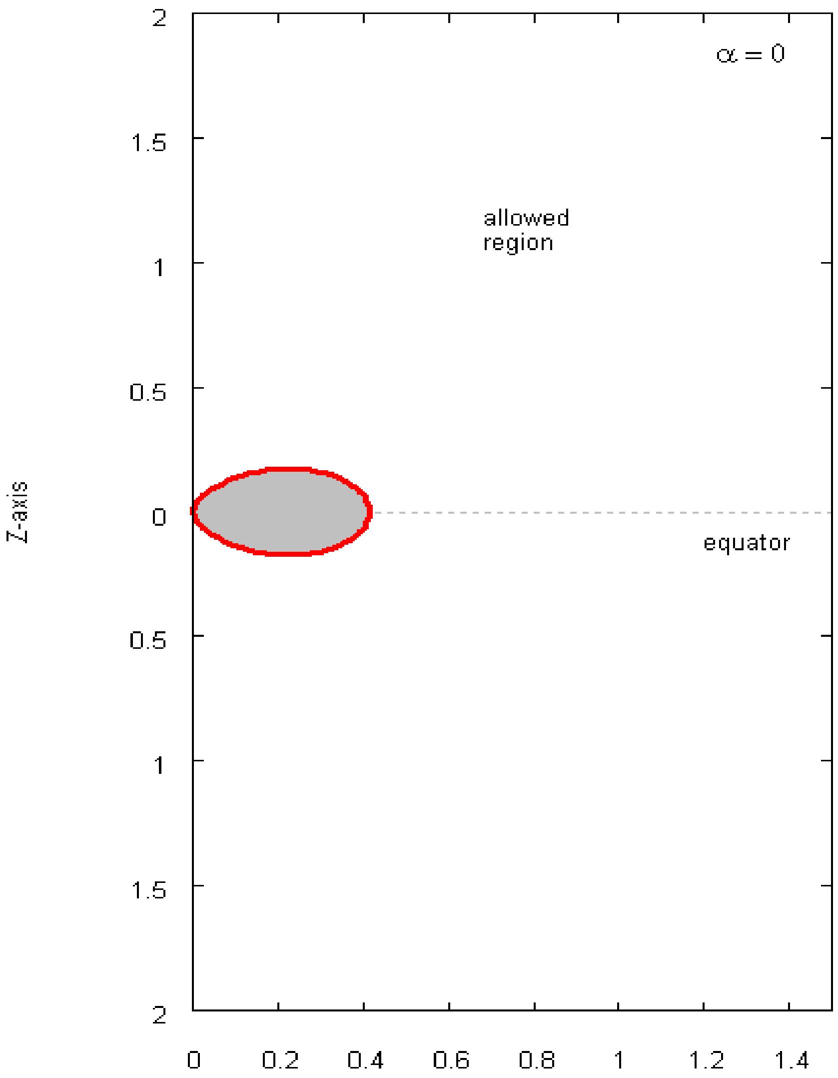
$$\rho \in [\rho_{12} , \infty [$$



الشكل 2-11

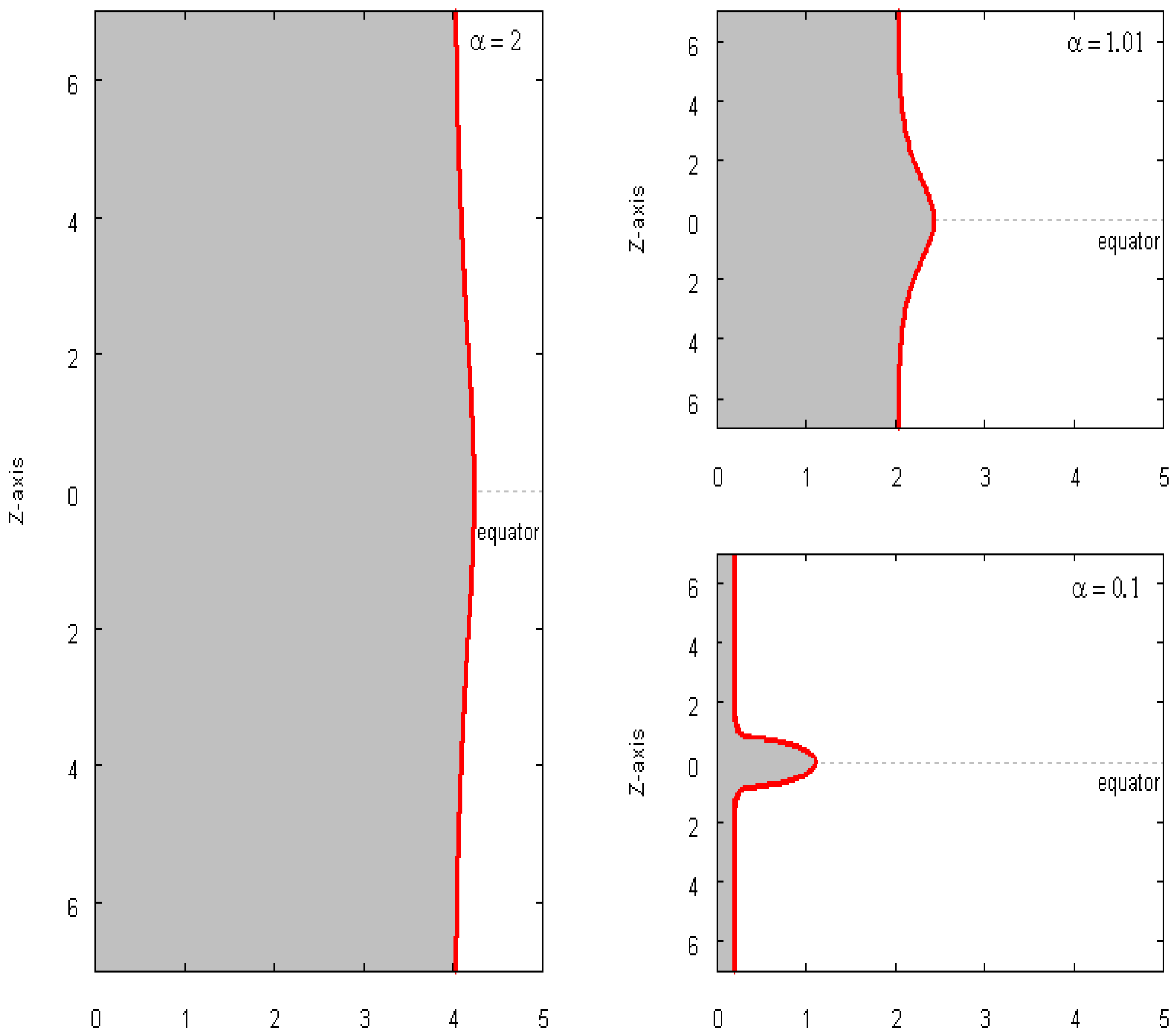
تغير حجم المنطقة المحظورة (المناطق المظللة) بدلالة ثابت الحركة α .

د ـ $\alpha \geq 0$: في هاته الحالـة يكـون لدينا ثلاثـة جـذور سالبة و هي ρ_{21} ، ρ_{22} و ρ_{11} و لدينا فقـط ρ_{12} موجب و عليـه فان المتراجـحة (1) محققة من اجل $\rho > \rho_{12}$ و هي إذا المنطقة المسموحة حركيا :
الشكل (2-12) يوضح المنطقة المسموحـة حركيا من اجل $\alpha = 0$ و الشكل (2-14) يوضح كيف تتغير هاته المنطقة بدلالة ثابت الحركة α



الشكل 2-12

المنطقة المسموحة (الغير مظللة) من اجل $\alpha = 0$ و هي الحالة الوحيدة التي يكون فيها المحور (OZ) ضمن المنطقة المسموحة حركيا .



الشكل 13-2

تغيرحجم المنطقة المحضورة حركيا (المنطقة المظللة) بالنسبة للقيم الموجبة لثابت الحركة α .

3-2 الحركة في الحقل المغناطيسي الأرضي (تقريب ثنائي القطب)

1-3-2 القطع المغناطيسي

يتعرض مسـار الجسيم المشحون عندما يدخل حقلا مغناطيسيا إلى الانحناء ، يتناسب نصف قطر الانحناء طردا مع العطالة المغناطيسية وعكسا مع شدة الحقل ، أي أن مقدار توغل الجسيم في الحقـل يزدادكلما زادت العطالـة المغناطيسية ويقل كلما زادت شـدة الحقل ، و عليه فان الجسيـمات ضعيفة الطاقة يتم إرجاعها من قبل الحقل المغناطيسي ، تسمى هاته الظاهرة بالقطع المغناطيسي .
يتطلب إذا بلـوغ نقطة ما من الحقل أن يمتلك الجسيم حدا أدنى من العطالة المغناطيسية (الطاقة) ، يسمى هذا الحد عطالة القطع و يرمز له ب R_c بالنسبة لتلك النقطة أي انه لا يمكن أبدا أن نجد جسيـما عندها بعطالة مغناطيسية اقل من R_c .
من اجل تحديـد قيمة القطع المغنـاطيسي بالنسبة لنقطة ما إحداثيـا ا (ρ_d, λ_d) في حقـل ثنائي القطب المغناطيسي ، نحدد أولا قيمة القطع من اجل الحالات المختلفة لثابت الحركة α ، و اصغر القيم تعتبر قيمة القطع ، لدينا حالتين :

ا- $\alpha < -1$:

يتم تحديد قيمة القطع انطلاقا من معادلة السطح (2-26)كما يلي :

$$\rho_d = \frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \xi \cos^3 \lambda_d}}{\cos \lambda_d}$$

نعوض عن ρ_d ب $\rho_d = \frac{r_d}{l}$ ، و عن l ب $\sqrt{\frac{\mu_0 M \mathbf{c}}{4\pi R}}$ نجد :

$$R_{c1} = \frac{4\pi}{\mu_0 M \mathbf{c}} \left(\frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \xi \cos^3 \lambda_d}}{r_d \cos \lambda_d} \right)^2 \qquad (27-2)$$

و هي قيمة القطع المغناطيسي ، الرمز R_{c1} لتمييز الحالة الأولى عن الحالة الثانية .نلاحظ أن هاته القيمة تتناقص مع الثابت α و تأخذ اقل قيمة من اجل $\alpha = -1$:

$$R_{c1} = \frac{4\pi}{\mu_0 M \mathbf{c}} \left(\frac{1 + \sqrt{1 - \xi cos^3 \lambda_d}}{r_d \, cos \lambda_d} \right)^2 \qquad (28-2)$$

و هي اقل قيمة للعطالـة المغناطيسية التي يجب أن يمتلكها الجسيم كي يبلغ النقطة التي إحداثيا (r_d , λ_d) **أي انه لا يمكن أن نجـد عند هاته النقطة جسيما كونيـا له ثابت حركة** $\alpha < -1$ **بعطالة مغناطيسية دون هاته القيمة.**

ب – $\alpha > -1$:

من اجل تحديـد قيمة القطع في هاته الحالة ننطلق من معادلة السطح (2-24) الذي يمثل أقصى النقاط التي تستطيع هاته الجسيمات أن تبلغها (و بالتالي اقل قيمة للعطالة المغناطيسية) :

$$\rho_d = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \xi cos^3 \lambda_d}}{cos \lambda_d}$$

و منه نجد أن :

$$R_{c2} = \frac{\mu_0 M \mathbf{c}}{4\pi} \left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \xi cos^3 \lambda_d}}{r_d \, cos \lambda_d} \right) \qquad (29-2)$$

و هي دالة متزايدة مع الثابت α وتأخذ اقل قيمة من اجل $\alpha = -1$ **:**

$$R_{c2} = \frac{\mu_0 M \mathbf{c}}{4\pi} \left(\frac{-1 + \sqrt{1 + \xi cos^3 \lambda_d}}{r_d \, cos \lambda_d} \right)^2 \qquad (30-2)$$

بمقارنة العبارتين (2-28) و (2-30) نجـد أن $R_{c2} < R_{c1}$ **مهما كانت قيمة λ و عليه فان** R_{c2} **تمثل القطع المغناطيسي المطلق أي انه لا يمكن رصد جسيم كوني عند نقطة ما إحداثيا** (r_d , λ_d) **عطالته المغناطيسية اقل من** R_{c2}**. بالرمز ب** R_c **للقطع المطلق نكتب :**

$$R_c = \frac{\mu_0 M \mathbf{c}}{4\pi}\left(\frac{1-\sqrt{1+\xi \cos^3 \lambda_d}}{r_d \cos\lambda_d}\right)^2 \qquad (31-2)$$

و هي العبارة التي تحدد اقل قيـمة للعطالة المغناطيسية يمكن أن نرصد بها جسيـما كونيا عنـد نقطة ما و لا يمكن أن نجـد جسيما كونيـا عطالته المغناطيسية دون ذلك . العبـارة التي تظهر ارتباط القطـع (غير مطلق) بزاوية الورود شرق-غرب هي :

$$R_c = \frac{\mu_0 M \mathbf{c}}{4\pi}\left(\frac{1-\sqrt{1+\xi \sin\eta \cos^3 \lambda_d}}{r_d \sin\eta \cos\lambda_d}\right)^2 \qquad (32-2)$$

2-3-2 تطبيق على الحقل المغناطيسي الأرضي

تشبه بنية الحقل المغناطيسي الأرضي بالقرب من الأرض (على مسافة تقل عن خمسـة أضعاف نصف قطر الأرض) بنية الحقل الناشئ عن ثنائي قطب مغناطيسي عزمه المغناطيسي متجها نحو الجنوب و قيمته [4]:

$$M = 7.68 \times 10^{22}\ \mathrm{Am}^2$$

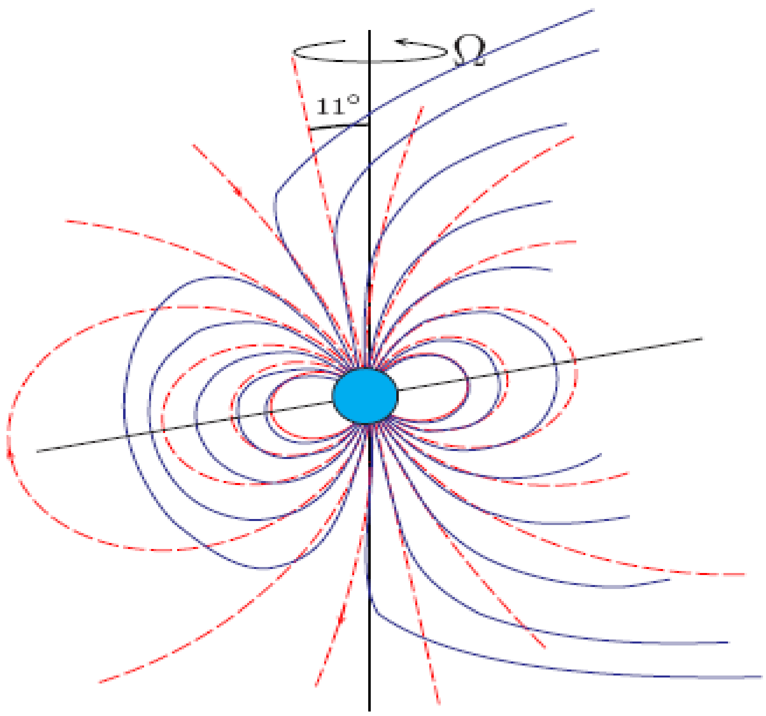
تبلغ قيمة الحقـل المغناطيسي الأرضي عند خـط الاستواء وعلى مستوى سطح البحر 300 µG و تزداد بالاتجـاه نحو القطبيـن حيث تبلغ الضعف ، و يميل محور ثنائي القطب المغناطيسي الأرضي بزاوية قدرها 11 درجة عن محـور دوران الأرض (الشكل 2-14) ، حيث يقع القطب المغناطيسي الشمالي عند خـط العرض 81 درجة شمالا وخط الطول 110 درجة غـربـا .

عنـد اعتبار الحقل المغناطيسي الأرضي مطابقا لحقـل ثنائي القطب المغناطيسي وأخـذ نظام الإحداثيات بحيث ينطبق المحور (OZ) على محور ثنائي القطب (geomagnetic coordinats) ويكون العزم المغناطيسي متجها نحو الجنـوب (الشكل 2-8) فان حركة الجسيمات المشحونة فيه توصف تماما بالنتائج الـواردة في الفقـرة السابقـة .

إن التقريب الأولي الذي يعتبر الحقل المغناطيسي الأرضي مطابق تماما لحقل ثنائي قطب مغناطيسي يسمـح بتفسير العديد من الظواهر المتعلقة بانتشار الجسيمات المشحونة حول الأرض ، وبشكل خاص حساب قيم

القطع المغناطيسي .

عندما تصبح الأشعة الكونية على مسافة من الأرض قدرها عشرة أضعاف نصف قطر الأرض تكون عمليا تحت تأثير الحقل المغناطيسي الأرضي فقط ، لأنه على هاته المسافات تكون قيم كل من الحـقل المغناطيسي الشمسي و الحقل المغناطيسي ا ري ضعيفة جدا مقارنة بقيمة الحقل المغناطيس الأرضي ، حيث أن قيـمة الحقل ا ري عند خط الاستواء و على مستوى سطح البحر هي 2.4 μG **والحقل الشمسي هي** 50 μG **و هي قيم ضعيفة بالنسبة للحقل الأرضي.**
يشكل الحقل المغناطيسي الأرضي ذرعا يمنع الجسيمات التي لا تملك حدا معينا من الطاقة من بلوغ سطح الأرض ، يسمى هذا الفعل ، القطع المغناطيسي الأرضي .



الشكل 2- 14
تمثل الخطوط المستمرة الحقل المغناطيسي الأرضي الحقيقي
وتمثـل الخطوط المتقطعة حـقل ثنائي القطب المغناطيسي .

نعرف القطـع بالنسبة لسطح الأرض على انه الحد الأدنى من العطالة المغناطيسية اللازم لبلـوغ سطح الأرض وعليـه و انطلاقا من المعادلة (32-2) وبالأخـذ في الاعتبـار الحقائـق التالية :

نصف قطر الأرض R_e **:**

$$R_e = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$$

السماحية المغناطيسية للهواء μ_0[4] **:**

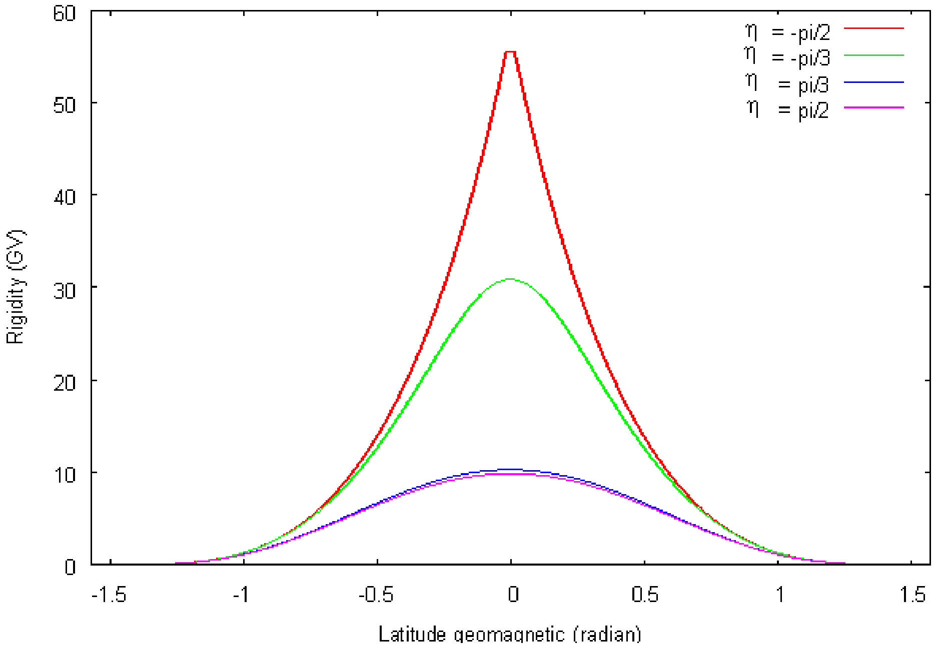
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

نجد أن القطع المغناطيسي بالنسبة لسطح الأرض يعطى ب :

$$R_{min} = 57.68 \times \left(\frac{1 - \sqrt{1 + \xi \sin\eta \cos^3 \lambda_d}}{\sin\eta \cos\lambda_d} \right)^2 \text{ GV} \quad (28-2)$$

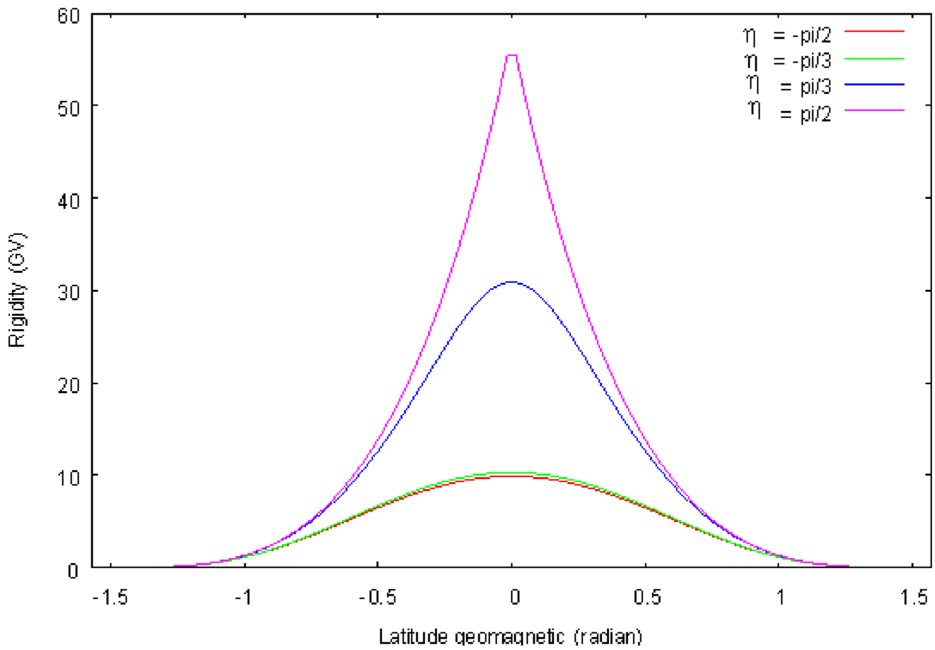
نلاحظ أن قيمة القطع تكون اكبرما يمكن عند خط الاستواء وتقل كلما اتجهنا نحو القطبين (الشكل 15-2) بالنسبة لجسيم موجب الشحنة اقل قيمة لها (قيمة القطع المطلق) تكون من اجل $\eta = \frac{\pi}{2}$ $(\approx 10 \text{ GV})$ **أما بالنسبة لجسيـم سـالب الشحنـة فهي اقـل ما يمكـن من اجـل** $\eta = -\frac{\pi}{2}$ **(الشكل 16-2) .**

إن امتلاك الجسيمات لطاقـة اكبر من قيمة القطع لا يعني بالضرورة بالضرورة قدر ا على بلوغ أي نقطة لان تعرضها لعملية القطع يتوقف أيضا على اتجاه دخولها .



الشكل 2– 15

القطع المغناطيسي بالنسبة لسطح الأرض الخاص بالجسيمات موجبـة الشحنـة .

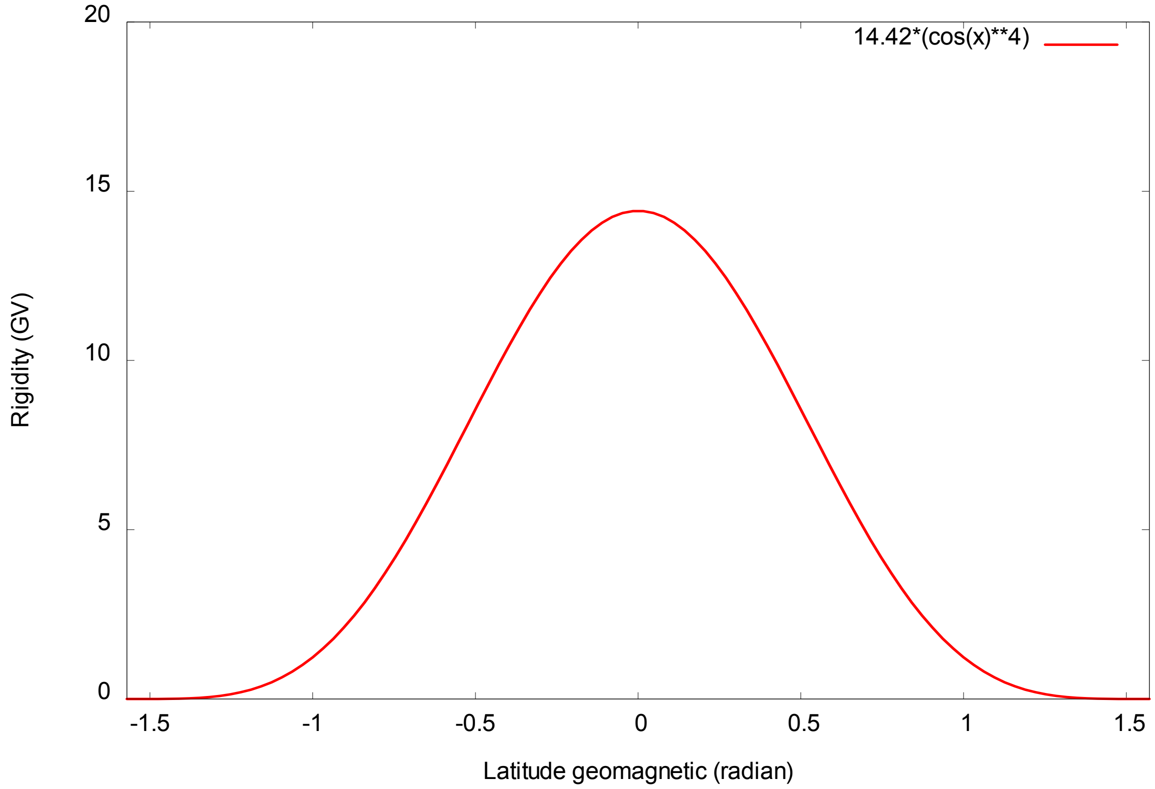


الشكل 2–16

القطع المغناطيسي بالنسبة لسطح الأرض الخاص بالجسيمات سالبـة الشحنـة .

نستنتج عبارة القـطع بالنسبة للجسيمات التي تتحـرك في مستوى الزوال المغناطيسي (meridia plan) **حيث** sinη = 0 **(الشكل** 17-2**)**:

$$R_{min} = 14.42 \times cos^4 \lambda_d \qquad (29-2)$$



الشكل 17-2

القطع المغناطيسي الأرضي بالنسبة للجسيمات المتحركة
في مستـوى الزوال المغنـاطيسـي .

4-2 المسارات (الحل العددي لمعادلة لورنتز)

كما لاحظنا في الفقرتين السابقتين فان الحل التحليلي لمعادلة لورنتز ، لجسيم يتحرك في حقل ثنائي القطب المغناطيسي ، سمح لنا بتحديد المناطق المسموحة حركيا كما سمح أيضا بتحديد قيم القطع المغناطيسي لكنه لم يؤدي إلى الشكل الصريح لمعادلة المسار . في مثل هاته الحالة وغيرها كتلك التي تستخدم نماذج عدديـة لوصف الحقول المغناطيسية يتطلب الحصول على شكل المسارات التي تتبعها الجسيمات استخـدام الطرق العددية لحل معادلة لورنتـز.

أنجع الطرق العددية لحل معادلة لورنتز هي طريقة رونج-كيتا Runge-kutta **من الرتبة الرابعة . تستخدم هاته الطريقة في حل المعادلات التفاضلية من الشكل التالي :**

$$\frac{\mathrm{dy}}{\mathrm{dt}} = f(t, y)$$

و الحل هو :

$$y_{i+1} = y_i + \frac{k1}{6} + \frac{k2}{3} + \frac{k3}{3} + \frac{k4}{6}$$

حيث :

$$k1 = h \times f(t_i \,, y_i \,)$$
$$k2 = h \times f(t_i + h/2 \,, y_i + k1/2\,)$$
$$k3 = h \times f(t_i + h/2, \; y_i + k2/2)$$
$$k4 = h \times f(t_i + h, \; y_i + k3)$$

يمثل الثابت h **الخطوة :**

$$h = t_{i+1} - t_i$$

و تستخدم أيضا لحل المعادلات التفاضلية من الرتبة الثانية :

$$\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{dt}^2} = f(t, y', y)$$

حيث يتم تخفيض الرتبة بإدخال تابع جديد على النحو التالي :

$$y' \equiv \frac{\mathrm{dy}}{\mathrm{dt}} = v$$

و منه يصبح لدينا جملة معادلات تفاضلية من الرتبة الأولى :

$$\frac{\mathrm{dy}}{\mathrm{dt}} = v$$

$$\frac{\mathrm{d}\,v}{\mathrm{dt}} = f(\mathrm{t}, v, y)$$

و الحلول هي :

$$v_{i+1} = v_i + k1/6 + k2/3 + k3/3 + k4/6$$
$$y_{i+1} = y_i + l1/6 + l2/3 + l3/3 + l4/6$$

حيث :

$$l1 = h \times v_i$$
$$k1 = h \times f(\mathrm{t}_i\ , v_i\,, y_i\ )$$
$$l2 = h \times (v_i + k1/2\ )$$
$$k2 = h \times f(\mathrm{t}_i\ + h/2\ , v_i + k1/2\ , y_i + l1/2\ )$$
$$l3 = h \times (\upsilon_i\ + k2/2\ )$$
$$k3 = h \times f(\mathrm{t}_i\ + h/2, v_i + k2/2\ ,\ y_i + l2/2)$$
$$l4 = h \times (v_i + \mathrm{k}3\ )$$
$$k4 = h \times f(\mathrm{t}_i\ + h, v_i + k3\ ,\ y_i + l3)$$

تتفكك معادلة لورنتز إلى ثلاثة معادلات تفاضلية من الرتبة الثانية وهي في الإحداثيات الكارتيزيةكمايلي :

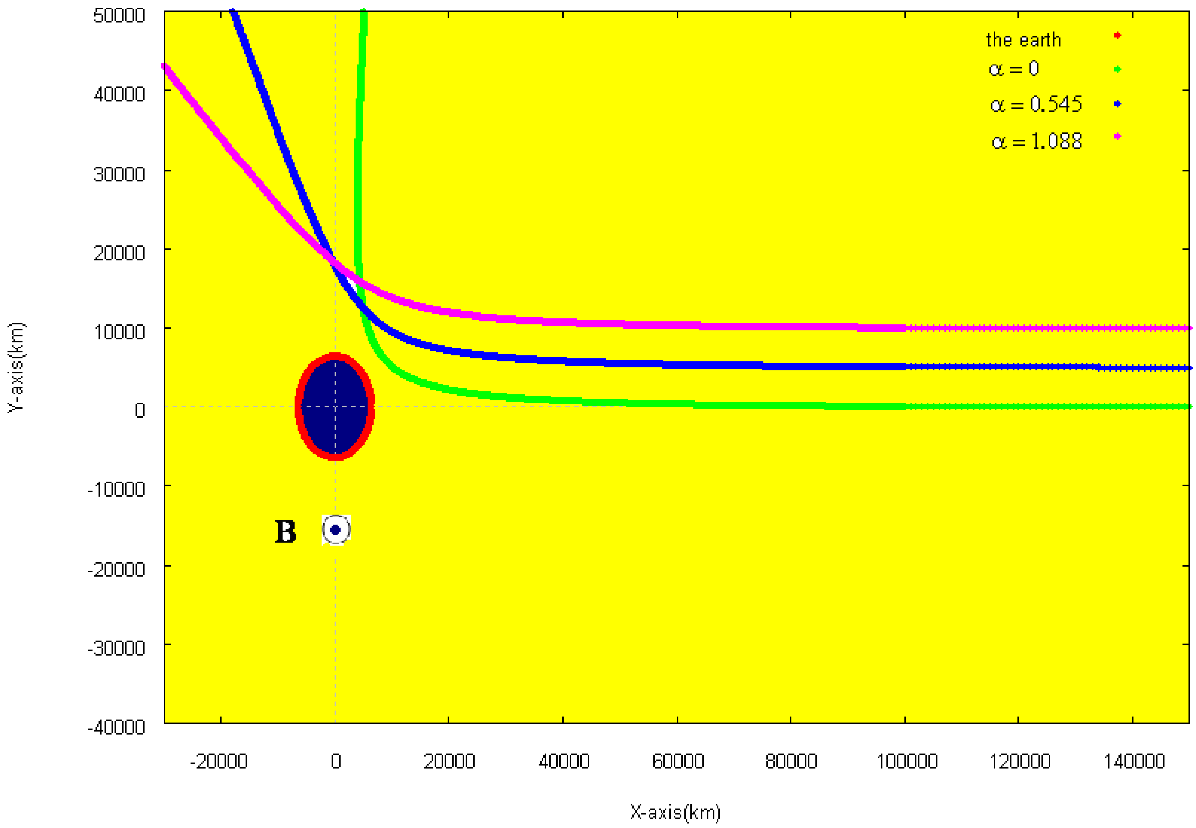
$$\left.\begin{aligned}\frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{q}{m\gamma}\left(b_z v_y - b_y v_z\right)\\ \frac{d^2 y}{dt^2} &= \frac{q}{m\gamma}\left(b_x v_z - b_z v_x\right)\\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{q}{m\gamma}\left(b_y v_x - b_x v_y\right)\end{aligned}\right\} \qquad (30-2)$$

حلول هاته الجملة هي :

$$\left.\begin{aligned}v_x(i+1) &= v_x(i) + \frac{kx1}{6} + \frac{kx2}{3} + \frac{kx3}{3} + \frac{kx4}{6}\\ v_y(i+1) &= v_y(i) + \frac{ky1}{6} + \frac{ky2}{3} + \frac{ky3}{3} + \frac{ky4}{6}\\ v_z(i+1) &= v_z(i) + \frac{kz1}{6} + \frac{kz2}{3} + \frac{kz3}{3} + \frac{kz4}{6}\end{aligned}\right\} \qquad (31-2)$$

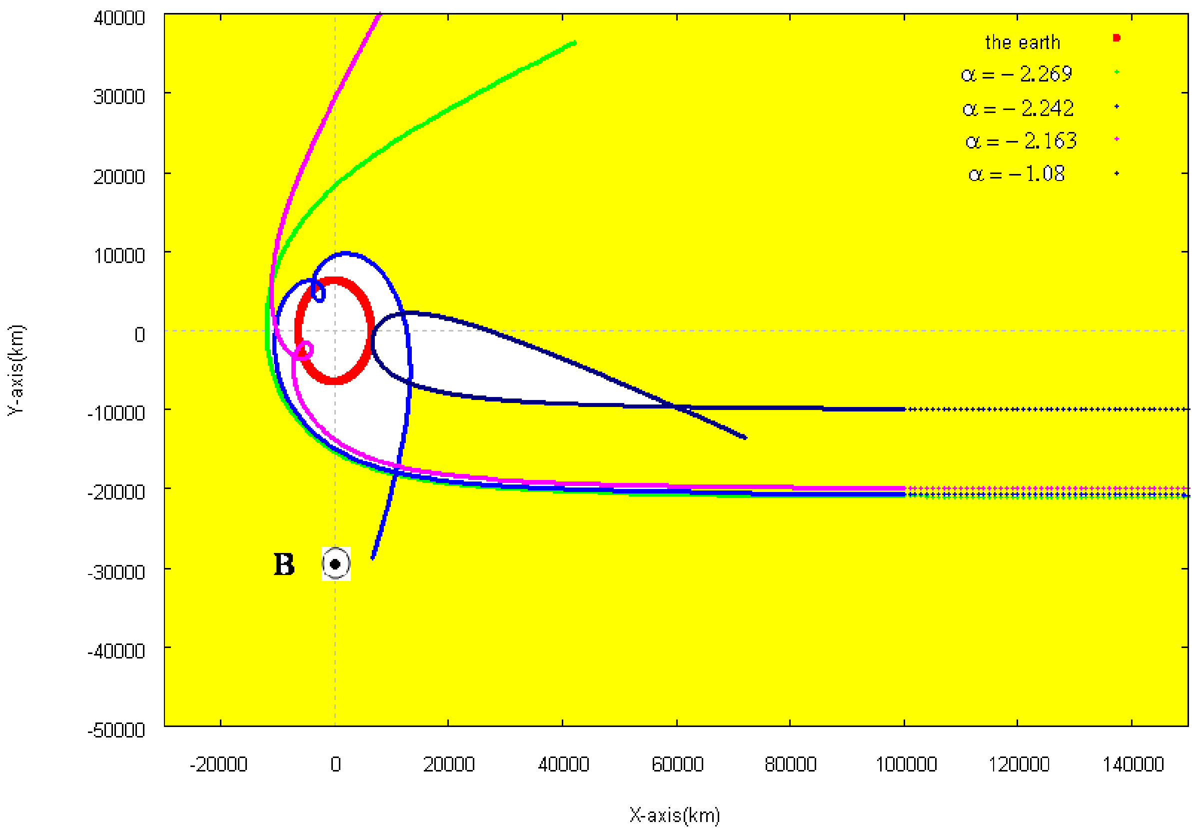
$$\left.\begin{aligned}x_{i+1} &= x_i + \frac{lx1}{6} + \frac{lx2}{3} + \frac{lx3}{3} + \frac{lx4}{6}\\ y_{i+1} &= y_i + \frac{ly1}{6} + \frac{ly2}{3} + \frac{ly3}{3} + \frac{ly4}{6}\\ z_{i+1} &= z_i + \frac{lz1}{6} + \frac{lz2}{3} + \frac{lz3}{3} + \frac{lz4}{6}\end{aligned}\right\} \qquad (32-2)$$

يظهر الشكلين (2-18 و2-19) مســارات بروتــون في المستــوى الاستوائي لحقل الأرض المغناطيسي (تقريب ثنائي القطب) تم الحصول عليها باستخــدام طريقة رونج-كيتا من اجــل عــدة قيــم لثابت الحركة α كما يظهر الشكل (2-20) مسار بروتون حول الأرض.



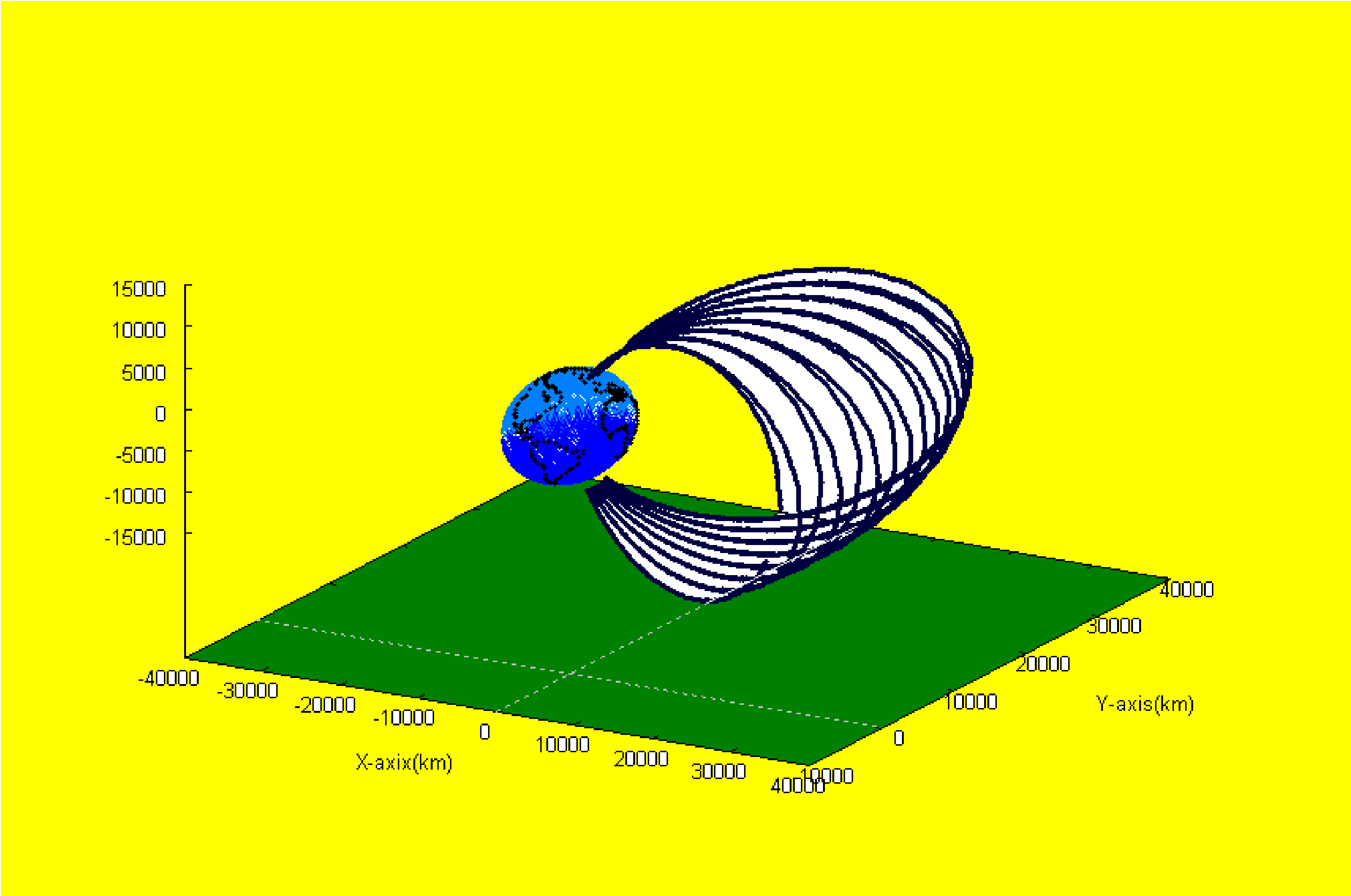
الشكل 2-18

مسارات بروتون طاقته $E = 25.77$ GeV .



الشكل 19-2

مسارات بروتون طاقته E = 25.77 GeV .



الشكل 2-20

مسار بروتون طاقته 1.142 GeV **و ثابت حركة** $\alpha = -1.79 \times 10^{-8}$ **حول الأرض .**

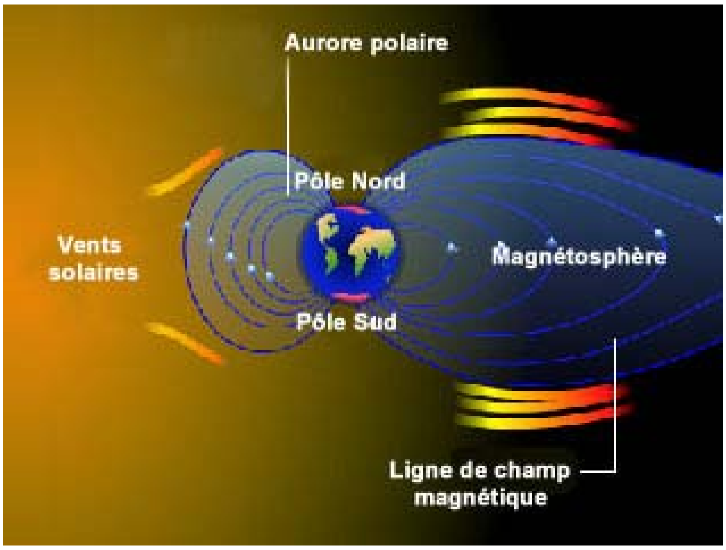
الفصـل الثـالث

المحـاكـــــاة

يتعرض هذا الفصل لعمليـة محاكاة انتشار الأشعـة الكونيـة في الحقل المغناطيسي الأرضي و هو مقسم إلى ستة بنود . في البند الأول وصف للحقـل المغناطيسي الأرضي الحقيـقي وكيفية التعبير عنه بالنماذج العددية ، في البند الثاني نجد وصفا للتجربة الفضائية AMS-01 التي أنجزت لقياس تدفق الأشعـة الكونية بالقرب من الأرض و ملخص مل النتائـج التي تحصلت عليها ، في البند الثالث نجد الأسس التي بنيت عليها عملية المحـاكـاة وفي البند الرابع نجد بالتفصيل العمليات الحسابيـة المتعلقة بعملية الانتشار حيث يتضمن هذا البنـد التعريف بطريـقة مونت-كارلو و في البند الخامس عرض للنتـائج التي توصلنا إليها من خلال عملية المحاكاة و مقارنتها مع نتائج التجربة AMS و في البند السادس و الأخير الخلاصة العامة .

3-1 الحقل المغناطيسي الأرضي الحقيقي

تتأثركل من شـدة الحقل المغناطيسي الأرضي واتجاهه في كل نقطة من نقـاطه بعاملين أساسيـين احدهما داخلي (جيـولوجي) ويتمثل في عدم استقرار البنية الباطنية للأرض وعدم تـجانس توزيع المكونات ، أما العامـل الأخر فهو خارجي ويتمثل في الريـاح الشمسية (الشكل 3-1) والتيارات الحلقيـة التي تسببها الجسيمات المحتجزة داخـل منطقة الماغنيـطوسفار (magnetospher) .تؤدي هاته العـوامل إلى نوعيـن من التغيرات في الحقل المغناطيسي ، النوع الأول هو تغيرات محليـة في شدة واتجاه الحقـل و هي تغيرات تحدث خلال فترات زمنية قصيرة (من بضعة ثواني إلى غاية عدة سنوات) ، وتظهر على شكل اهتـزازات حول قيمة معينة لشدة الحقل هاته التغيرات يسببـها بشكل أساسي العامل الخارجي إضافـة إلى التيارات التي تسببها حركة المواد الغنية بالحديد الموجودة بباطن الأرض (مبدأ التوليد dynamo لفاراداي Faraday) أما النوع الثاني فهوتغيرات مستمرة بعيـدة المدى ويسببها حصرا العـامل الجيولوجي أي عـدم استقرار البنية الداخلية للأرض .فقد أثبتت عمليـات القياس أن شـدة الحقل المغناطيسي تتناقص باستمرار بمعدل 0.05% كل سنـة[21] ،كما أن مقر القطبيـن يتغير أيضا باستمرار بحيث يـ اح محور الحقـل المغناطيسي بمعـدل 0.014% كل سنة (اثبت علم التاريخ المغناطيسي للأرض paleomagnetic أن الحقل غير اتجـاهه 171 مرة خلال أل 75مليـون سنة الأخيـرة) .



الشكل 3-1 **.**
تأثير الرياح الشمسية على الحقل المغناطيسي الأرضي .

إن هاته التغيرات جعلت من التعبير عن الحقل المغناطيسي الأرضي بدالة تحليـليـة أمرا مستحيل و لذلك فقـد تم اللجـوء إلى وضع نماذج عددية للحقل المغناطيسي الأرضي ، تعتـمد كل النـماذج العدديـة على العمل الذي قدمـه فريديريك غوس (Gauss) **سنة** 1838**. في هذا العمل أهملت التغيرات التي يحدثها العامـل الخارجي (تمثل** 1%**) واخـذ في الحسبان فقط التغيرات الناجـمة عن العامل الجيولوجي و اعتبر الحقل المغناطيسي مشتق من كمون سلمي**[23] **:**

$$\mathbf{B}(r,\theta,\phi,t) = -\nabla V(r,\theta,\phi,t)$$

حيث :

$$V(r,\theta,\phi,t) = \sum_{l=1}^{N}\sum_{m=0}^{l}\left(\frac{a}{r}\right)^{l+1}\left(g_l^m(t)\cos(m\phi) + h_l^m(t)\sin(m\phi)\right)P_l^m(\cos\theta) \quad (1-3)$$

حيث تمثل $P_l^m(\cos\theta)$ **توابع لوجوندر** Legendre **المرافقة و هي تحقق الشرط التالي :**

$$\oint \left(P_l^m(\cos\theta)\right)^2 d\Omega = \frac{4\pi}{2l+1}$$

المعامـلات $h_m^l(t)$ **و** $g_m^l(t)$ **هي معاملات غوس** (Gauss) **ويتم الحصـول عليها بالقياس المباشر للحقل المغناطيسي الأرضي .**

العـدد الطبيعي N **يتم اختيـاره على حسب الدقة المطلوبة ، يشار هنا إلى انه هناك علاقة تربط بين هذا العـدد و عـدد عمليات القياس المباشر اللازمة**[23] **و هي :**

عدد عمليات القياس = $(N+1)^2-1$

أما الثابت a **فهو متوسط نصف قطر الأرض (**6371.2**كلم) .**

أكثر النماذج العددية استعمالا نجد النموذج IGRF10 (international geomagneti referencs of field) **هنا العدد** 10 **يمثل الدقة التي يستخدمها هذا النموذج أي** N=10 **.**

3-2 التجربـة AMS

3-2-1 وصف التجربة[24]

التجربة AMS (alpha magnetic spectrometer) **هي تجربة فضائية تتمثل في وضع جهاز لكشف الأشعة الكونية (الجسيمات بصفة عامة) في مدار حول الأرض وبالضبط على متن محطة الفضاء الدوليـة** (alpha **هو الاسم القديم لمحطة الفضاء الدولية** ISS) **، أهم أهداف هاته التجربة هو رصد الانويـة المضادة و قياس تدفق كل عنصر من عناصر الأشعة الكونية ، كل على حدة . يسمى الجهاز المستخـدم في هاته التجربـة** AMS **وهو جهاز للتحليل الطيفي المغناطيسي (مطياف مغناطيسي) .**

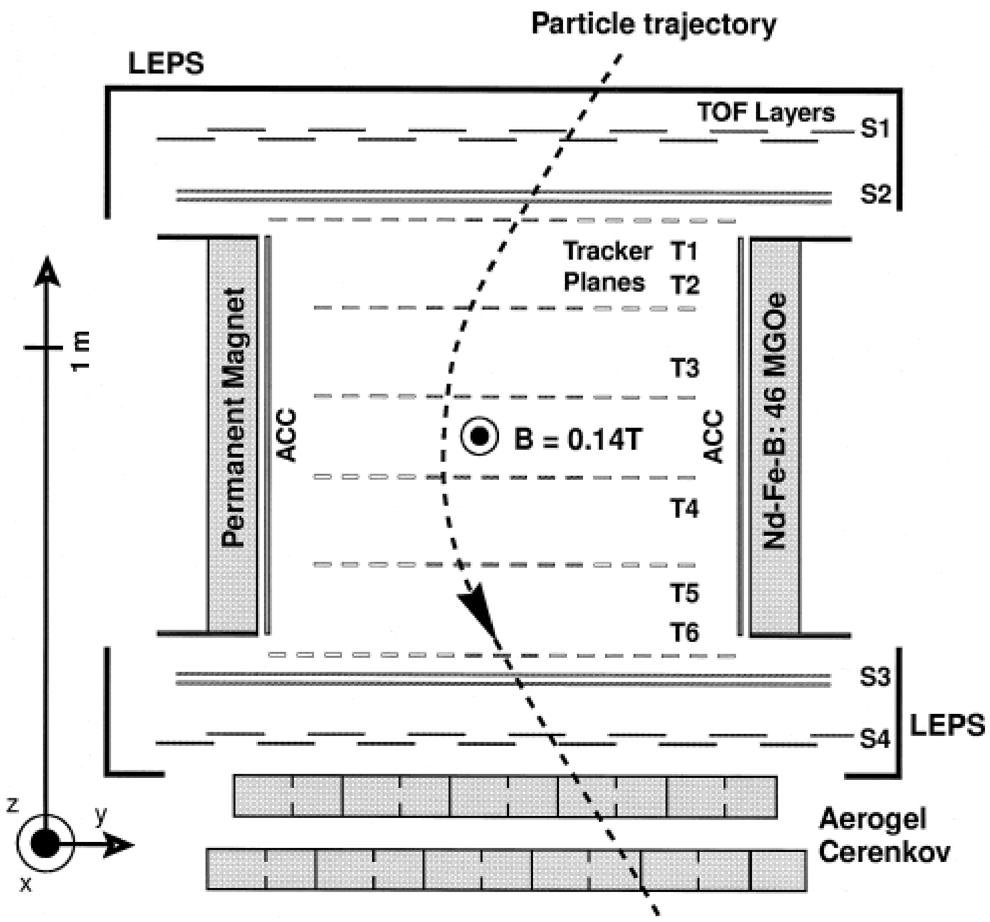
أجريت التجربـة AMS **أول مرة سنة** 1998 **حيث وضعت النسخة الأولى من الجهاز** AMS **(يشار إليها ب** AMS-01 **) على متن المركبة ديسكوفري** discovery **أثناء قيامها برحلتها المسماة** STS-91 **. استغرقت التجربة مدة تسعة أيام و عشرون ساعة ، دارت خلالها المركبـة حول الأرض في مـدار يميـل عن خط الاستـواء ب** 51 **درجة أي أنها قامت بمسح المنطقـة المحصـورة بين خـطي العرض** 51 **و** -51 **درجـة و على ارتفاع تراوح ما بين** 320 **كلم و** 390 **كلم ، و قد كان محور المطياف (oz) متجها على الدوام نحو الأعلى . يتكون الجهاز** AMS-01 **(الشكل**3-1**) من ستة كواشف هي :**

- المغناطيس الدائم و هو جـهاز اسطواني الشكل ارتفاعه 800 ملم ، نصف قطره الداخلي 557 ملم و نصف قطره الخـارجي 600 ملم ، يولد حقلا مغناطيسيا مشابه تقريبا لحقل ثنائي القطب المغناطيسي وعمودي على محور الاسطوانة ، شدتـه عند المحور تبلغ 0.14 T . يتم تحديد كتلة الجسيم اعتمادا على مقـدار انحراف مسار الجسيـم داخل هذا الحقـل و تحـدد الشحنـة اعتمادا على اتجاه الانحراف .
- جهـاز تحديد المسار tracker و هو عبارة عن ستة صفائح تحتوي على طبقات دقيقة من السيليسيوم (Silicium) يسمح هذا الجهـاز بتحديد مسار الجسيم في الحقل المغناطيسي كما يسمح بتحديد طاقـة و شحنـة الجسيم .
- جهاز تحديـد الزمن time of flight detector (TOF) يحدد هذا الجهاز الفترة الزمنية التي يستغرقها الجسيـم أثناء تحليقه داخل الحقل المغناطيسي وبالتالي سرعة الجسيـم كما يحدد أيضا القيمة المطلقة لشحنـة الجسيـم .

- عداد شيرينكوف (Cherencov) و هو مخصص لكشف الجسيمات الخفيفة كالإلكترون و البوزيترون
- جهاز منع التداخـل anticoincidence detector (VETO) و هو جهاز يسمح باستبعاد الجسيمات التي تخترق الجهازAMS-01 من الجوانب .
- إطـار bouclier (LEPS) مهمتـه صـد الجسيـمات ضعيـفة الطاقـة (E < 5 MeV) .

و هو ما جعـل المطيـاف المغنـاطيسي AMS-01 يتميز ب :

- القـدرة على تحديـد اتجـاه مجيء الجسيـمات (من الأعلى أو من الأسفل) .
- تحديـد إشـارة الجسيـم .
- تحديد طبيعة الجسيم (مادي أو كهرومغناطيسي) .
- قيـاس الطاقـة الحركيـة للجسيـم .
- قيـاس تدفق جسيـمات تصـل شحنتـها إلى غايـة Z =26 و ضمن مجـال طاقـوي يتـراوح مابيـن 100 MeV و 1 TeV .



الشكل 3-2
رسم تخطيطي للمطياف المغناطيسي AMS-01

3-2-2 نتائج التجربة AMS-01 [24]

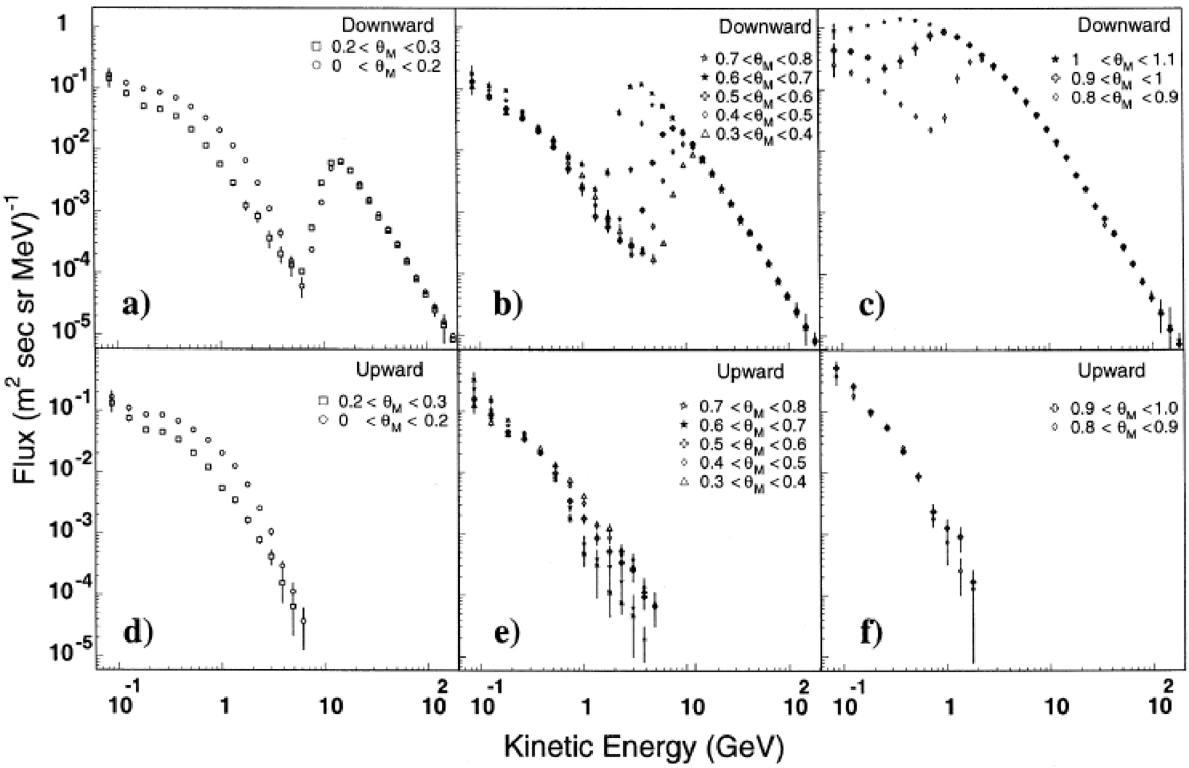
أدت التجربـة AMS-01 إلى النتـائـج التـاليـة :

- قيـاس التـدفـق التفـاضـلي للالكتـرونـات في المـال الطـاقـوي 0.15 – 30 GeV .
- قيـاس التـدفـق التفـاضـلي للبـوزيترونـات في المـال الطـاقـوي 0.15 – 3 GeV .
- AMS-01 لم ترصـد أية جسيـم من مضاد الهليوم (anti-helium) ، وعليه فقد وضعت حـدا أقصى

لنسبــة تواجــد هاته المــادة في الأشعــة الكونية الابتدائيــة ، حيث حددت هاته النسبــة كمايلي:

$$\frac{N(\overline{He})}{N(He)} = 1.1\times10^{-6}$$

- القياس الدقيــق للتدفق التفاضلي الابتدائي لكل من البروتونات ، الهليوم و الديتريــوم (الشكل3-3) في المــال الطاقــوي 0.1 – 200 GeV .



الشكل 3-3

نتائج التجربة AMS-01 .

3-3 أســس المحــاكــاة

إن هدف عملية محـاكاة انتشار الأشعـة الكونيـة في الحقل المغناطيسي الأرضي هو تحديد تأثيـر القطع المغناطيسي على التدفق التفاضلي للأشعة الكونية ، ومن ثم مقارنة النتائج المحصل عليها مع نتائـج التجربة AMS-01 ، وسنقتصر على البروتونات فقط كونها تشكل الأغلبية العظمى من الأشعة الكونية . إن عملية المحاكاة مبنية على الأسس التاليـة :

1- استخـدام طريقة مونت-كارلو Monte-carlo ، لان المسالة ذات طابع إحصائي و تتضمن متغيرات عشوائية .

2- اعتبـار أن تدفـق البروتـونات الابتدائية ، منتـظم ومتجـانس على سطح كـرة نصف قطرها $R=1.06\ R_e$ ، وهو الارتفاع الذي عنده أجريت التجربة AMS-01 .

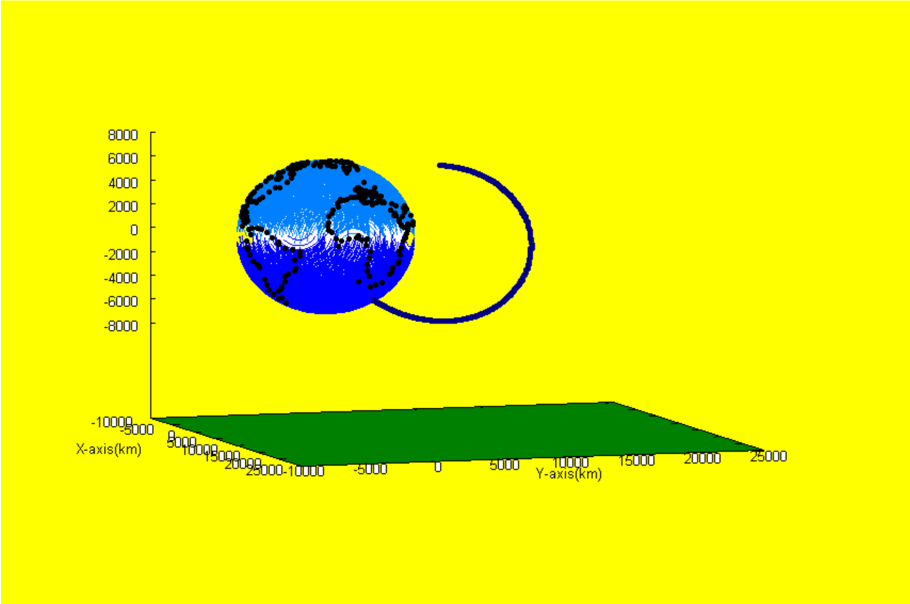
3- في المناطـق التي تبعـد عن الأرض بمسافـة تزيد عن عشرة أضعاف نصف قطـر الأرض ، حيث يكون تأثيـر الحقل المغناطيسي الأرضي مهملا ، يخضع الطيف الطاقـوي التفاضلي ، في المجـال 0.1 -200 GV ، للعلاقـة التاليـة [24] (الشكل 3-6) :

$$\phi = \phi_0 \times R^{-2.79} \qquad (2-3)$$

حيث :

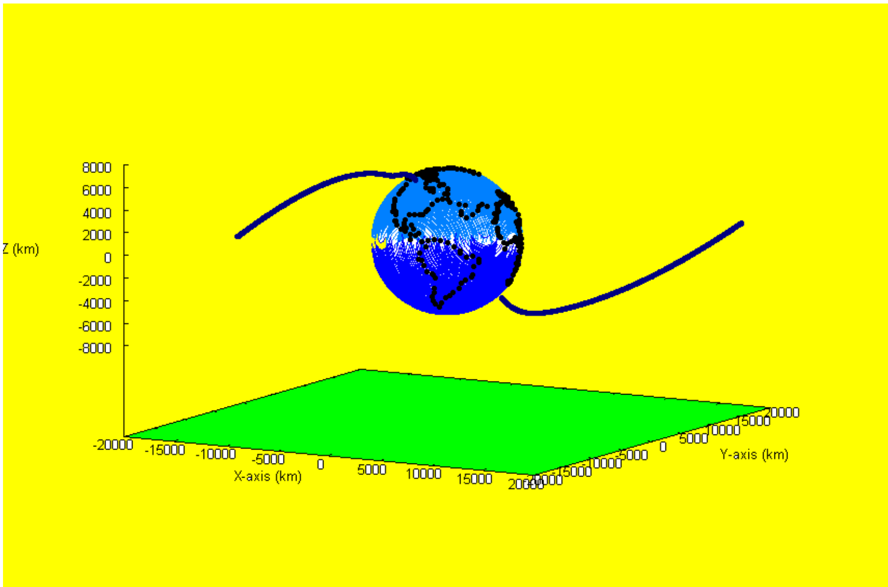
$$\phi_0 = 16.9\ (m^2 s\ sr\ \mathrm{MV})^{-1} (\mathrm{GV})^{2.79}$$

4- بما أن معادلة لورنتز متناظرة بالنسبة للشحنة و الزمن ، هذا يعني أن المسـار الذي يسلكه بروتون من اللانهاية نحو الأرض هو نفس المسـار الذي يسلكه بروتون-مضاد من الأرض نحو اللانهاية شرط أن يكـون له نفس كمية الطاقة . وعليه و من وجهة نظر رياضياتية ، فان مسار البروتـون يحـدد بمكاملـة معادلة الحركـة لبروتون-مضاد بنفس الطاقة ، و تتم عملية المكاملـة باستخـدام طريقة رونج-كيتا من الرتبة الرابعة .كما يتم استخدام النموذج IGRF 10 للفترة 2005 لوصف الحقل المغناطيسي الأرضي . وهنا علينا أن نميز بين ثلاثة أنواع من المسارات التي يمكن أن يسلكها البروتون المضاد ، اثنتين منها تعتبر مرفوضة و هي المسارات المغلقة (الشكل 2-20) و المسارات التي تصطدم بالأرض (الشكل 3-4) أما المسارات المقبولة فهي المسارات المفتوحة (الشكل 3-5) .



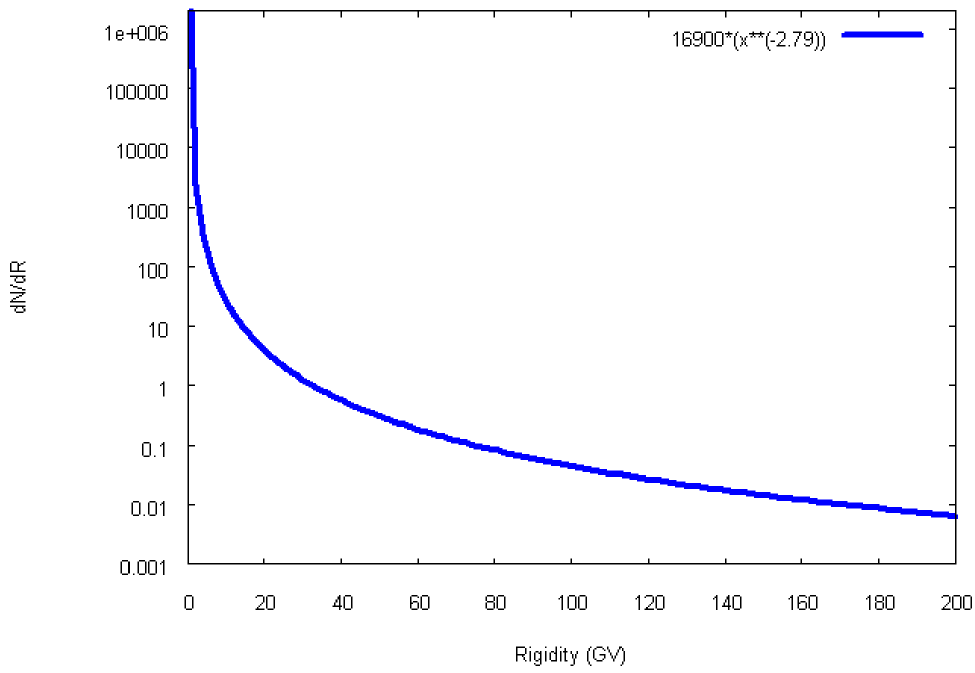
الشكل 3-4

مسار بروتون –مضاد يصطدم بالأرض و هو مسار مرفوض .



الشكل 3-5

مسارات مفتوحة نحو اللا نهاية لبروتون-مضاد وهي مسارات مقبولة لأنها تقابل مسارات بروتون كوني لم يتعرض لعملية القطع المغناطيسي .



الشكل 3-6

التدفق التفاضلي الابتدائي (قبل دخول الحقل المغناطيسي الأرضي) مقاسا ب $\left(m^2 s\ sr\ \mathrm{GV}\right)^{-1}$.

3-4 العمليات الحسابية

لحساب التدفـق التفاضلي للبروتونات الابتدائية عند الارتفاع حيث حلق المطياف المغناطيسي AMS-01 **و بدلا من التعامل مع العدد الكلي للبروتونات الابتدائيـة نقوم بأخـذ عينة فقط مكونة من** N_{esc} **بروتون بشـكل عشوائي والمقصود بالعشوائيـة هنا هو أن طاقـة الجسيم و موضعـه الابتدائي واتجاه سرعتـه (الشروط الابتدائية) تحدد بشكل عشوائي ، ثم نقوم بتتبـع مسار كل بروتون على حدا وذلك لتحديد ما إذا يتعرض هذا البروتون وفقا لتلك الشروط الابتدائية لعملية القطع المغناطيسي أم لا ، بعد تتبع مسارات كل جسيمات العينة نستطيع تحديد عدد البروتونات التي لم تتعرض للقطع ، وهو ما يسمح لنا في النهايـة بتحديد التدفق التفاضلي . و عليه يتم إجراء العمليات الحسابية على مرحلتين ، في المرحلة الأولى يتم إيجاد**

العلاقات التي تمكن من التحديد العشوائي للشروط الابتدائية للحركة و في المرحلة الثانية يتم إيجاد الصيغ التي تحدد التدفق التفاضلي النهائي .

3-4-1 التحديد العشوائي للشروط الابتدائية

من اجـل إيجاد مسار بروتون عطالته المغناطيسيـة R ، آت من بعيـد بحيث يتم رصده عند نقطـة تبعد عن مركز الأرض مسافة قدرها $1.06\times R_e$ (حيث حلق المطياف AMS-01) ، نقوم بحـل معادلة لورنتـز لبروتون-مضـاد ينطلق من نفس الارتفاع و بنفس الطاقة . وهو ما يتطلب تحديـد الشروط الابتدائيـة للحركة المتمثلة في مركبات الموضع الابتدائي x_0 ، y_0 و z_0 و مركبات السرعة الابتدائية v_{x0} ، v_{y0} و v_{z0} . و يتم ذلك على النحو التالي :

- الموضع الابتدائي هو نقطة عشوائية تقع على سطح كرة مركزها هو مركز الأرض و نصف قطرها هو

$$r_0 = 1.06\times R_e = 6700 \text{ km}$$

أما الزاويتين θ و ϕ فهما مقدارين عشوائيين تحددان كما يلي :

$$\theta = arccos(2\xi_2 - 1) \qquad (3-3)$$

$$\phi = 2\pi\xi_3 \qquad (4-3)$$

حيث أن كل من ξ_2 و ξ_3 عبارة عن أعداد عشوائية . و منه :

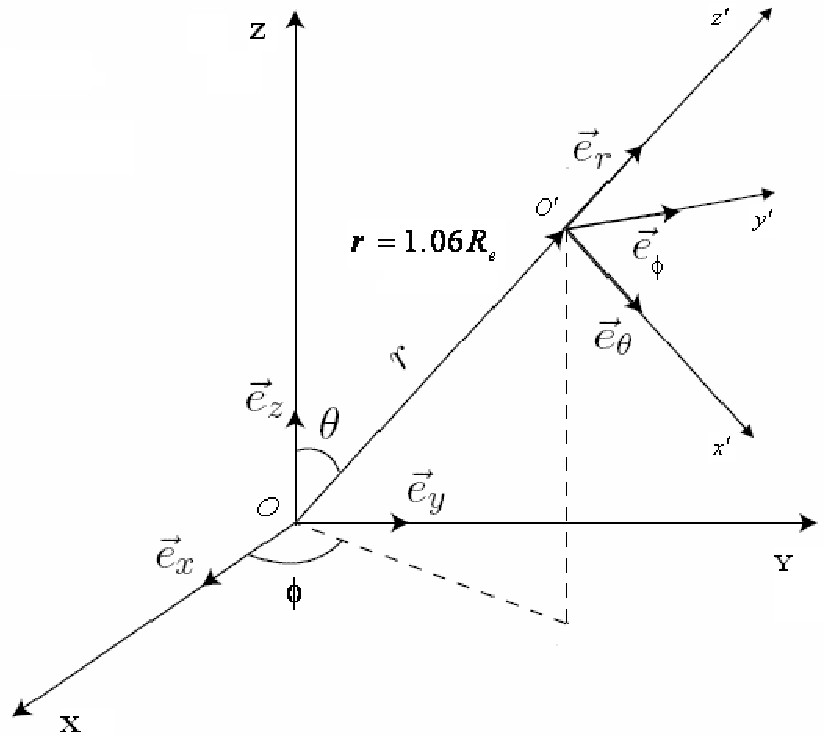
$$x_0 = r_0 \, sin\,\phi \, cos\,\theta$$

$$y_0 = r_0 \, sin\,\phi \, cos\,\theta$$

$$z_0 = r_0 \, cos\,\phi$$

- السرعـة الابتدائيـة v_0 هي أيضا مقـدار عشوائي ، تحـدد قيمتها v_0 انطلاقا من قيمة العطالة المغناطيسيـة (مقدار عشوائي) وفق الصيـغة التاليـة :

$$v_0 = \frac{qR}{\sqrt{m^2 \mathbf{c}^4 + q^2 R^2}}$$



الشكل 3-7

يرتبط نظام الإحداثيات المحلية بالمطياف المغناطيسي بحيث يكون محور المطياف منطبق على المحور $o'z'$ و قد ظل محور المطياف طوال الرحلة موازيا للشعاع $\vec{e}_r$.

تحدد القيمة العشوائية للعطالة المغناطيسية بدلالة الأعداد العشوائية كما يلي :

$$\xi_1 = \frac{\int_{R\,min}^{R} \phi_0\, R^{-2.79}\, \mathrm{d}\,R}{\int_{R\,min}^{R\,max} \phi_0\, R^{-2.79}\, \mathrm{d}\,R}$$

و منه نجد :

$$R = \left[\left(R_{min}^{p} + \xi_1\right)\left(R_{max}^{p} - R_{min}^{p}\right)\right]^{\frac{1}{p}} \qquad (5-3)$$

حيث : $p = 1 - 2.79 = -1.79$ **،** **و** ξ_1 **هو عدد عشوائي .**

الاتجاه العشوائي للسرعة الابتدائية يتحدد في معلم الإحداثيات المنحنية (الشكل 3-7) بالزاويتين θ_2 **و** ϕ_2 **(الشكل 3-8) ، و هما مقدارين عشوائيين يعطيان كمايلي :**

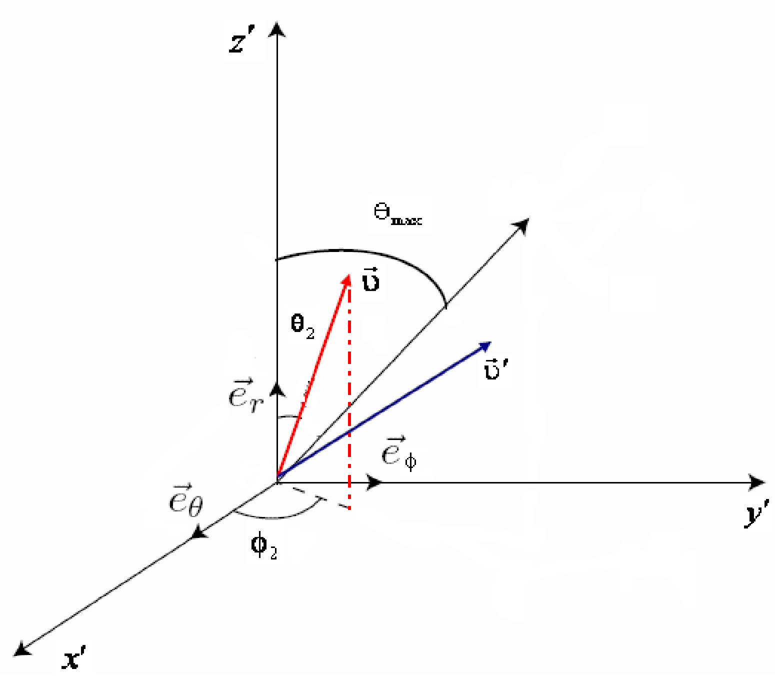
$$\theta_2 = arccos(2\xi_4 - 1) \qquad (6-3)$$

$$\phi_2 = 2\pi\xi_5 \qquad (7-3)$$

مع العلم أن الزاوية θ2 **تخضع للشرط التالي :**

$$0 < \theta_2 < \theta max$$

حيث $\theta \max = 32^\circ$ **و هي زاوية الرؤية عند الجهاز** AMS-01 .



الشكل 3-8

لا يستطيع بروتون مضاد بزاوية اكبر من زاوية الرؤية أن يغادر الجهاز AMS
أي انـه لا يمكن رصـد بروتـون يرد بزاويـة اكبر من زاويـة الرؤيـة .

3-4-2 تحديد التدفق التفاضلي النهائي

نقسم المجال الطاقوي (العطالي) المعتبر إلى 33 خلية (الشكل3-9) حيث أن عدد الخلايا يتم بشكل اختياري بحيث :

$$R(0) = 0.1$$

$$R(33) = 200$$

حدود الخلايا الأخرى تتحدد كمايلي :

$$R(i+1) = 10^{0.1} \times R(i) \qquad (3\text{-}8)$$

حيث :

$$i = 1,2,3.......\quad 31$$

و قد تم التقسيم على الأساس التالي :

$$log\frac{R(i+1)}{R(i)} = 0.1$$

نرمز ب $Bin(i)$ **للخلية التي حديها هما** $R(i)$ **و** $R(i+1)$ **و ب** $N0(i)$ **لعدد جسيمات الاختبار التي تقع عطالتها المغناطيسية ضمن مجال الخلية** $Bin(i)$ **و عليه :**

$$\sum_{i=0}^{32} N0(i) = N\,esc$$

و :

$$0 \le N0(i) \le Ntot$$

بالرمز ب $Nc(i)$ **لعدد جسيمات الخلية** $Bin(i)$ **التي لم تتعرض لعملية القطع المغناطيسي ، نجد أن التدفق التفاضلي للجسيمات التي عطالتها المغناطيسية** $R(i)$ **هو :**

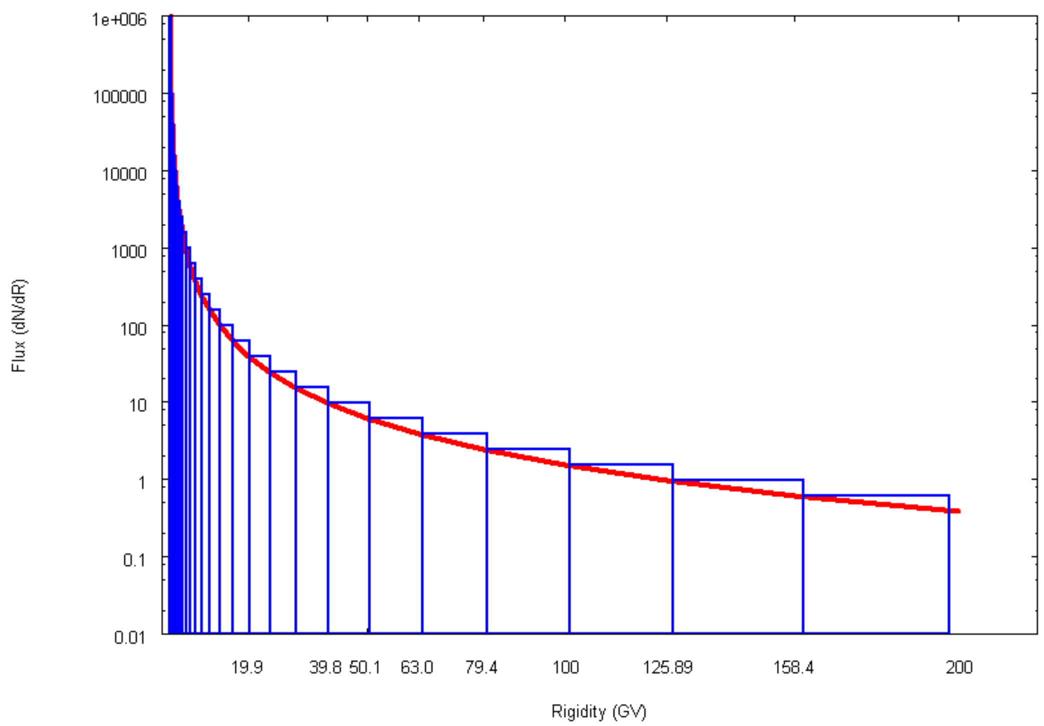
$$\phi = Nc(i)\frac{W}{R(i+1) - R(i)} \qquad (9-3)$$

حيث أن :

$$W = \frac{N_{tot}}{N_{esc}}$$

يمثل الوزن الإحصائي و هو عدد الجسيمات الحقيقية الذي يقابل جسيمة اختبار واحدة . أما $Ntot$ **فهو يمثـل العدد الكلي للجسيمات الواردة التي تجتاز وحدة المساحة و وحدة الزوايا ا سمة و تقع عطالتها المغناطيسية في ا ال** 0.2 – 200 GeV **، و يعطى ب :**

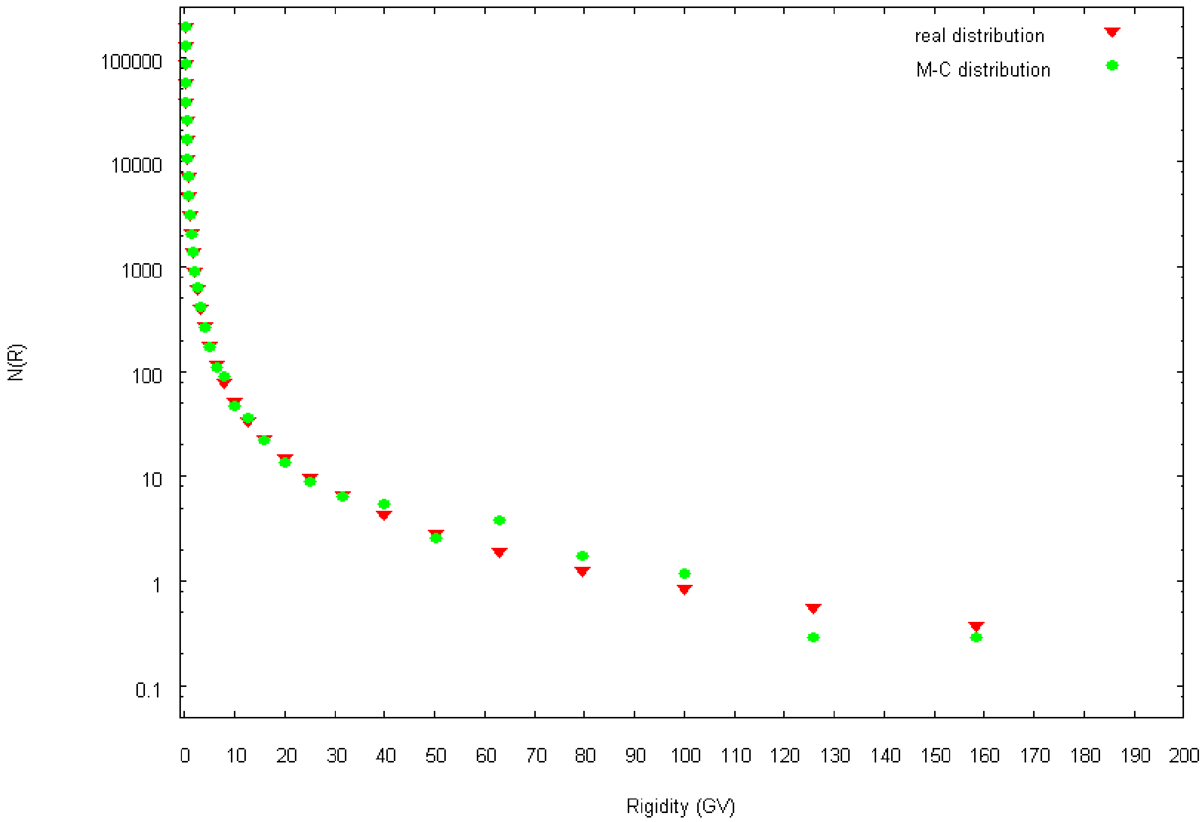
$$N_{tot} = \int_{R\,min}^{R\,max} \phi_0 \, R^{-2.79} \, dR = 582147.635604$$



الشكل 9-3 **.**

3-4-3 تنفيــذ عمليــة المــحاكــاة

نفذت عملية المحاكـاة بواسطة برنامج مكتوب بلغة سي++(c++) وهو مقسم إلى ثلاثــة أقسام ، يقــوم القسم الأول بتحديــد الشروط الابتدائية لكل جسيم من جسيمات العينة ويتم ذلك وفقا للمعادلة (3-5) حيث يقوم البرنامج بإعطاء قيما عشوائية للعدد ξ1 عن طريق مولد الأعداد العشوائية (random number generator) مما يؤدي إلى توزيع الجسيــمات على الخلايــا (3-8) و الموضحة بالشكل(3-9) ثم يقوم هذا القسم بحساب عدد الجسيمات في كل خليــة N0(i) ، يفترض هنا أن يكون هذا التوزيع (الشكل 3-10) مطابقا للتوزيع الحقيقي الذي تعطيه المعادلة (3-2) .



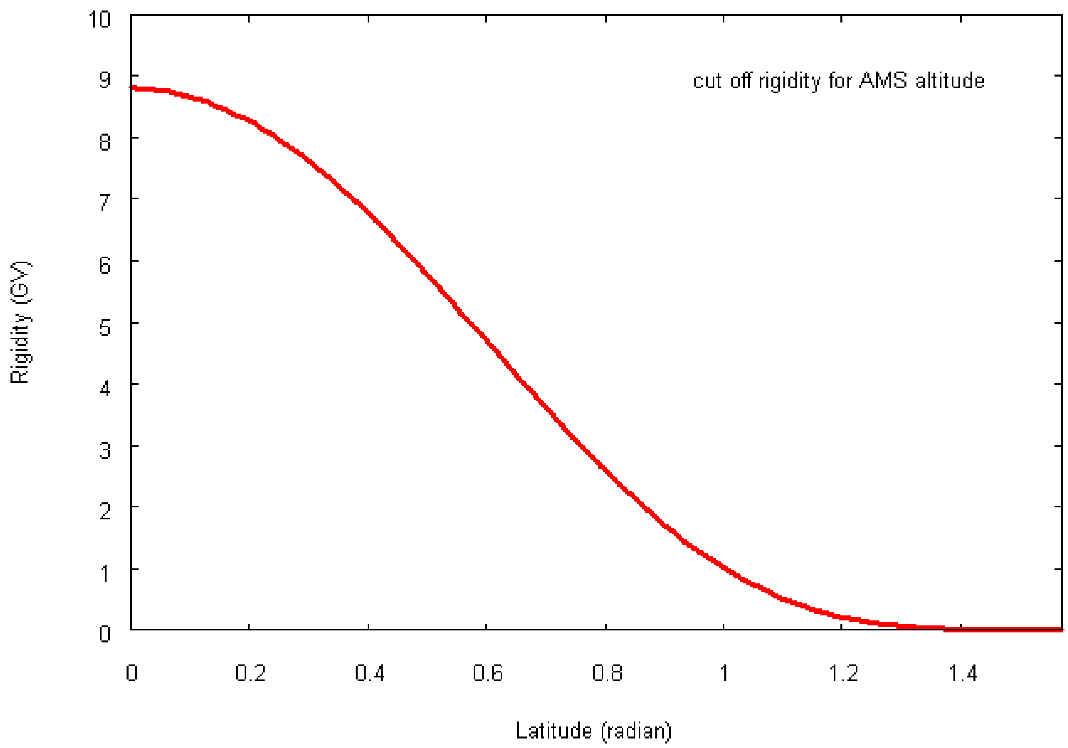
الشكل 3-10

التوزيع الذي تعطيه طريقة مونت-كارلو مقارنا بالتوزيع الحقيقي بعد اخذ عينة مكونة من 2 مليون جسيم .

في نفس الوقت يقوم القسم الأول بتحديـد الشروط الابتدائيـة الأخرى للجسيـم (السرعة و الموقع) وفقا للمعـادلات (3-3 ، 3-4 ، 3-6 و 3-7) و يتم ذلك أيضا عن طريـق مولد الأعداد العشوائيـة . بعد تحديـد الشروط الابتدائيـة للجسيم يقوم القسم الثاني من البرنامج بتتبـع مسـار كل جسيم وفقا للحلـول المعطاة بالمعادلات (2-31 و 2-32) ليحدد أي من هاته الجسيـمات تعرض أم لم يتعرض لعملية القطع المغناطيسي .في الأخيـر يقوم القسم الثالث من البرنامج بفرز الجسيـمات التي لم تتعرض للقـطع المغناطيسي و توزيعها على الخلايـا التي تنتمي إليها (العدد $N_c(i)$) ومن ثم حساب التدفـق النهائي وفقا للمعادلة (3-9) .

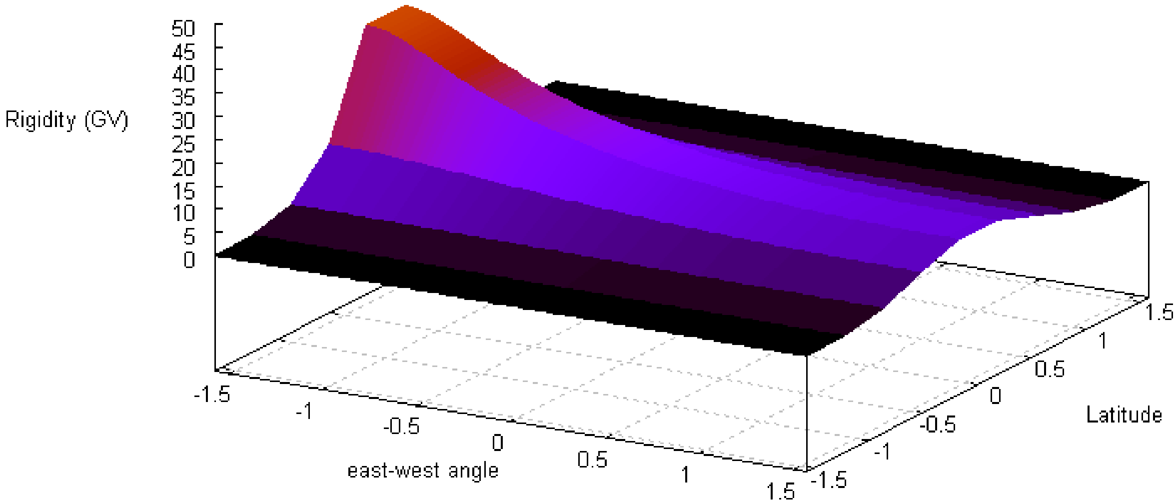
3-5 النتـائج و التعليقات

أولا نذكر أن قيـم القطع المغناطيسي تتغير مع الارتفاع ، و هي بالنسبة للارتفاع الذي أجريت عنـده التجربـة AMS-01 موضحـة بالشكلين (3-11 و 3-12) ، ونلاحظ أن قيم القطع تكون معدومة تقريبا ابتداء من درجة العرض $\lambda = 1.3$ (radian) ، و تكون أعظمية عند المنطقة الاستوائية (≈ 9GV) .



الشكل 3-11

قيم القطع المغناطيسي المطلق بالنسبة للتجربة AMS .



الشكل 3-12
ارتباط القطع المغناطيسي باتجاه الدخول .

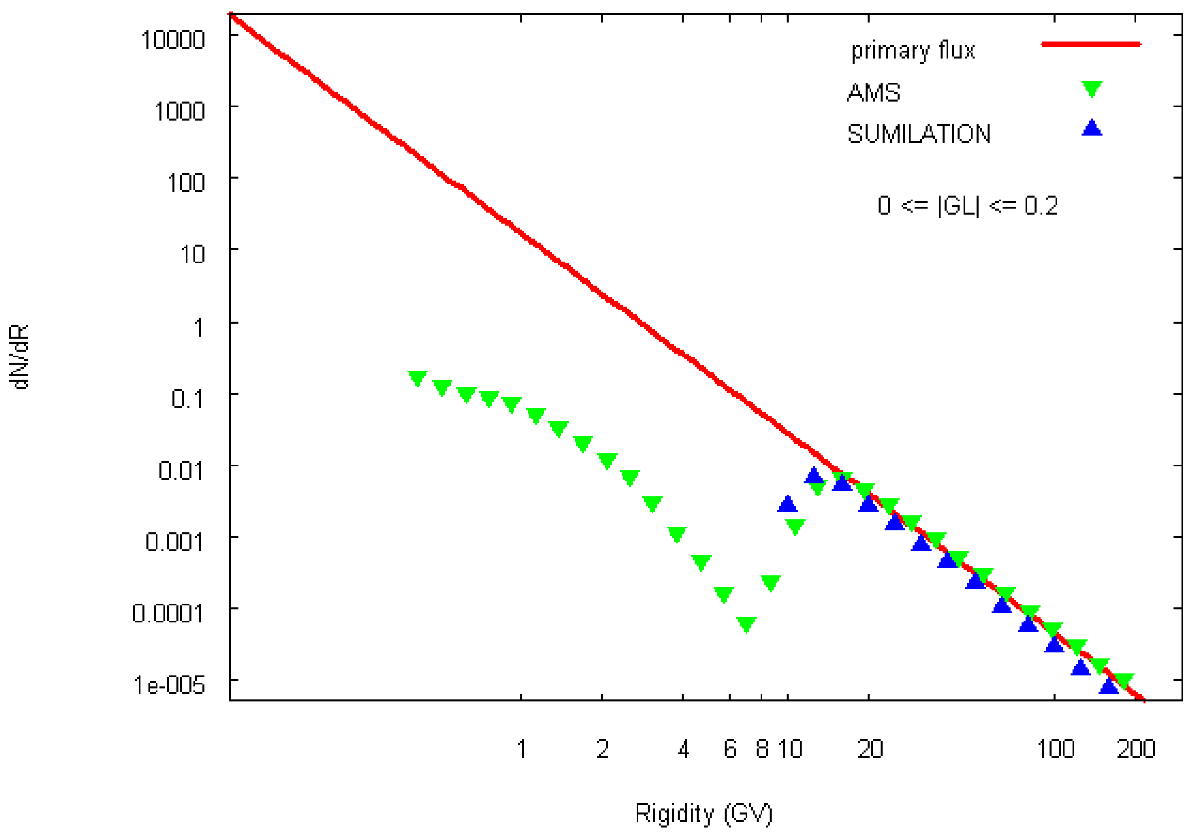
بعد استخدام عينة مكونة من 2 مليون بروتون-مضاد ($N_{esc} = 2\times10^6$) تنطلق من أربعة مناطق مختلفة هي:

أ- المنطقة الاستوائية $0 \le |GL| \le 0.2$.
ب- المنطقة الثانية $0.4 \le |GL| \le 0.5$.
ج- المنطقة الثالثة $0.7 \le |GL| \le 0.8$.
د- المنطقة الرابعة $1 \le |GL| \le 1.1$.

حيث GL تمثـل درجـة العرض ، تحصلنـا على النتـائـج الموضحـة بالأشكال الأربعة التاليـة مع العلم أن التدفـق التفاضلي مقـاس ب : $(m^2\ sr\ s\ \mathrm{MV})^{-1}$ و أن التمثيـل في كل الأشـكال مأخـوذ بالأسـاس اللـوغـاريـتـمي .

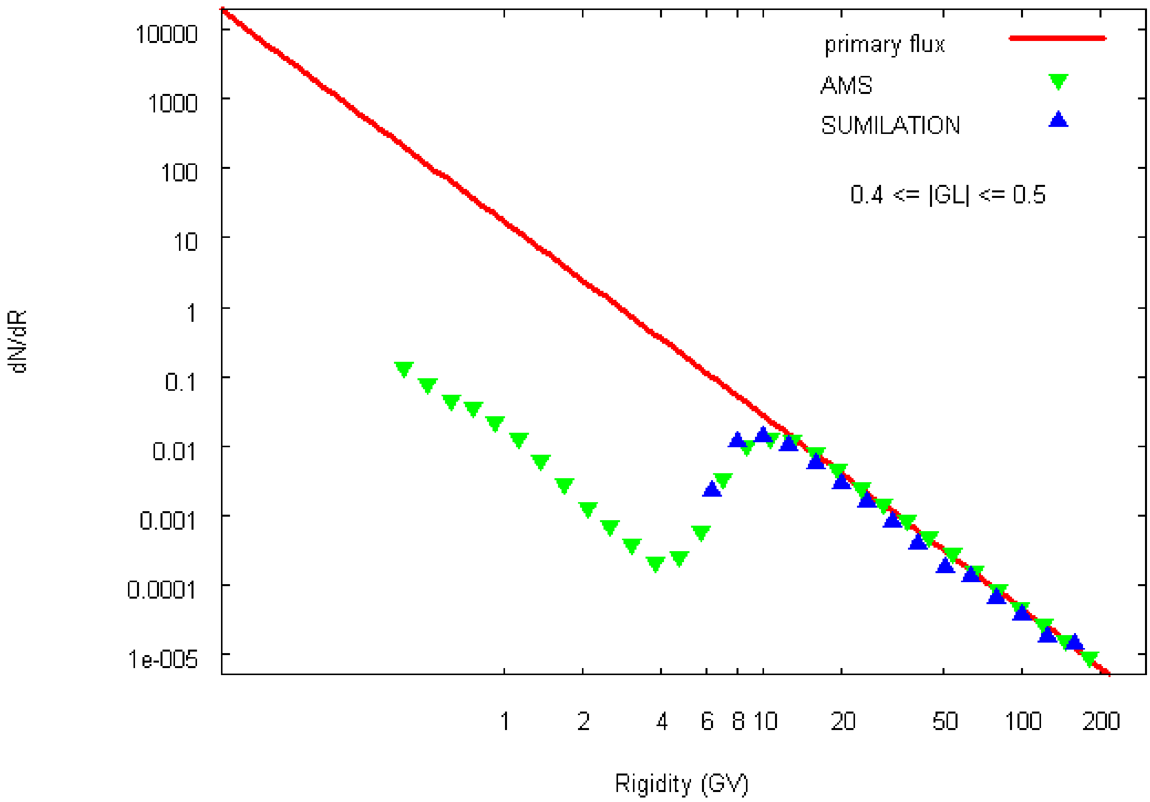
الشكل الموالي (13-3) يبين نتائـج عمليـة المحاكاة في المنطقة الاستوائية و هو يظهر أن منحنى التدفـق التفاضلي يبـدأ بالتأثر نتيـجة عمليـة القطع المغناطيسي ابتـداء من القيـمة $R = 18\ \text{GV}$ حيث يبدأ بالتنـاقص إلى أن ينعـدم تماما عند القيمة $R = 10\ \text{GV}$ و هي قيـمة القطع المطلق كما نلاحظ أيضا أن الجسيمات عالية الطاقة لا تتأثر بالقطع المغناطيسي .

نلاحـظ أيضا أن التجربة AMS-01 سجلت وجـود جسيمات بطاقة اقل من قيـمة القطع المطلق وقد تم تفسير ذلك على أ ا جسيمات ثانوية مرتدة (albédo) و ليست ابتدائية .



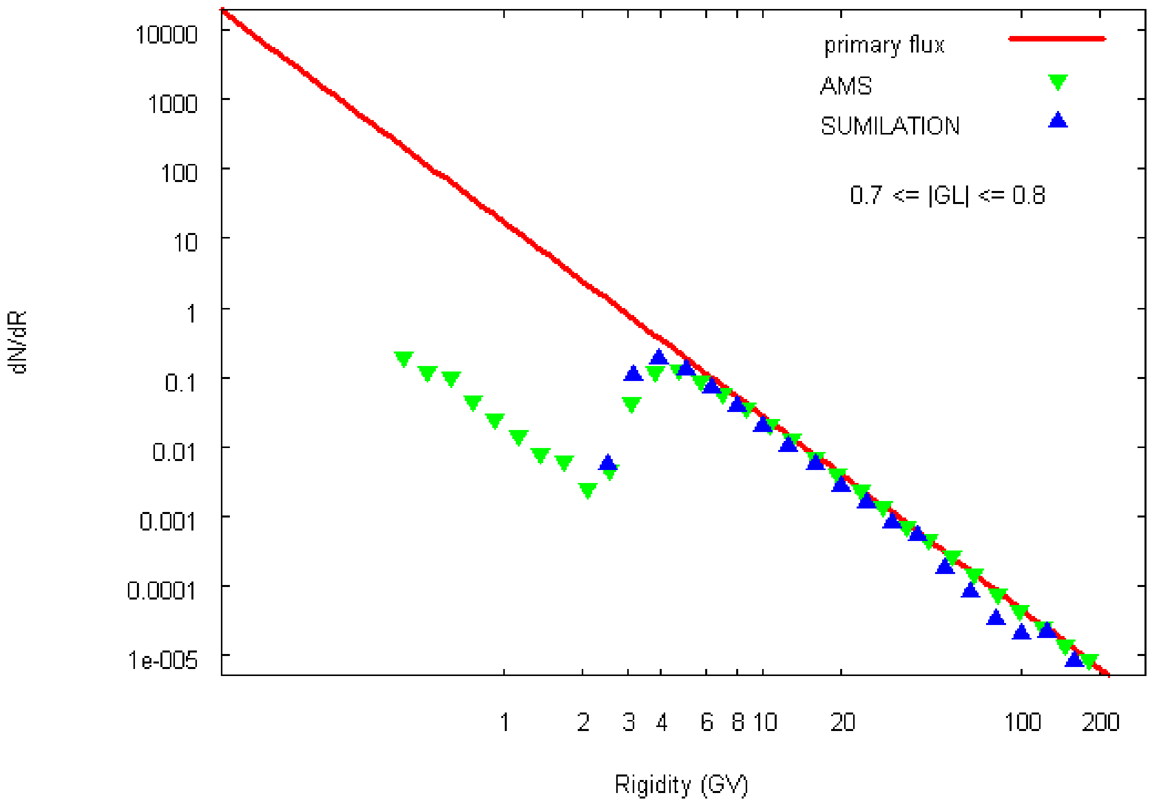
الشكل 13-3 .

الشكل الموالي (3-14) يبين نتائج عملية المحاكاة في المنطقة الثانية و هو يظهر أن الجسيمات عالية الطاقـة لا تتأثر بالقطع المغناطيسي و أن منحنى التدفـق التفاضلي يبدأ بالتأثر انطلاقا من القيـمة $R = 15\ \mathrm{GV}$ **حيث يبدأ التدفق التفاضلي بالتناقص إلى أن ينعدم عنـد القيمة** $R = 6\ \mathrm{GV}$ **و هي قيـمة القطع المطلق بالنسبة لهاته المنطقة . ونلاحـظ دائما تسجيل جسيمات مرتدة من قبل التجربة AMS-01 .**



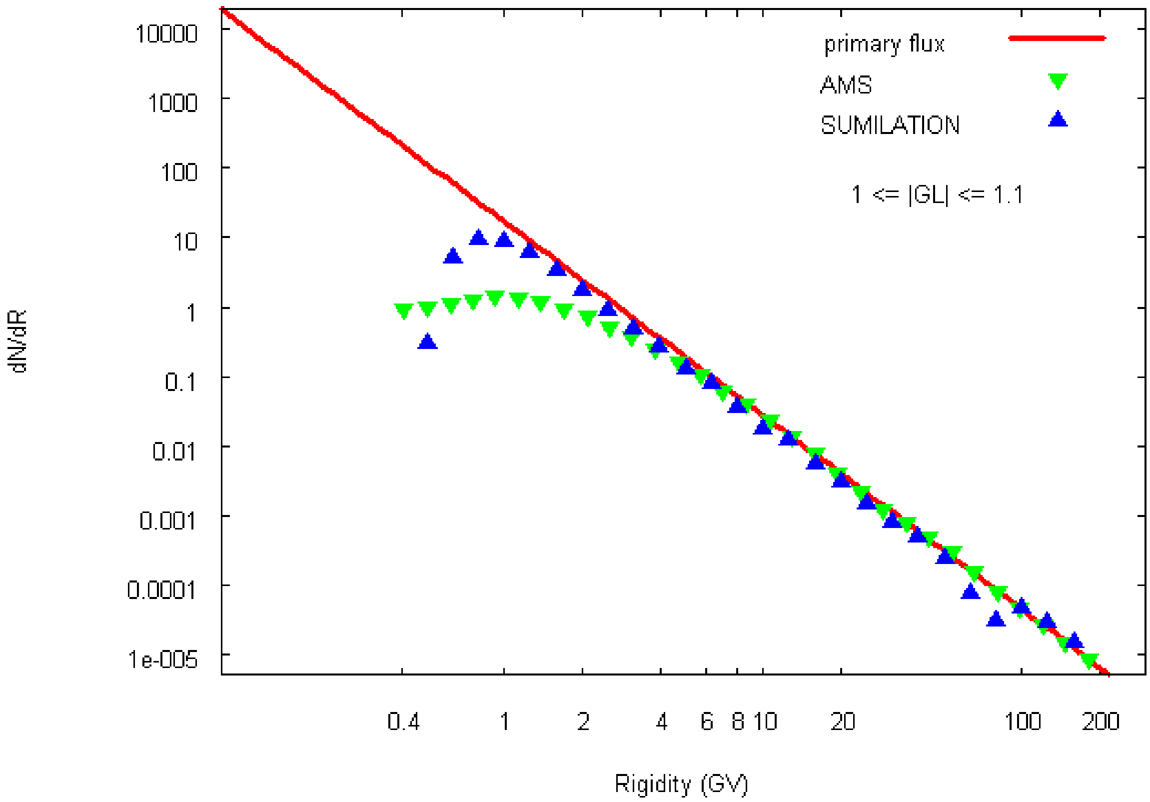
الشكل 3-14 .

الشكل الموالي (3-15) يبين نتائج عمليــة المحاكاة في المنطقة الثالثة وهو يظهر عدم تأثر الجسيمات عاليــة الطاقة بالقطع المغناطيسي و أن منحنى التدفــق التفاضلي يبدأ بالتأثر عنــد القيمة $R = 5\ \text{GV}$ حيث يبدأ التدفق التفاضلي بالتناقص إلى أن ينعــدم عند القيمة $R = 2\ \text{GV}$ وهي قيــمة القطع المطلق بالنسبة لهاته المنطقة ، و دائما نلاحظ تسجيــل التجربة AMS-01 للجسيمات المرتدة .



الشكل 3-15 .

الشكل الموالي (3-16) يبين نتائج عمليـة المحاكاة بالنسبة للمنطقة الرابعة و هو يظهر عدم تأثر الجسيمات عالية الطاقة بالقطع المغناطيسي و أن منحنى التدفق التفاضلي يبدأ بالتأثر عند القيمة $R = 1.5$ GV **و ينعدم عند القيمة** $R = 0.4$ GV **و هي قيمة القطع المطلق بالنسبة لهاته المنطقة .**



الشكل 16-3 .

ما يمكن ملاحظته أيضا و على وجه الخصوص بالنسبة للمنطقة الاستوائية و المنطقة الثانية هو عدم التطابق بين نتائج المحاكاة و نتائج التجربة AMS-01 فيما يخص قيمة القطع المطلق حيث أن قيمة القطع المطلق التي تقدمها عمليــة المحاكاة اكبر من تلك التي تقدمها التجربة AMS-01 ، كما أن القطع عنــد AMS يتــم بشكل اقل حدة مما يتم به عن طريق المحاكاة .

إن الاختلافات البسيطة المسجلة بين نتائج عملية المحاكاة و نتائج التجربة AMS-01 يمكن إرجاعــها إلى :

- التجربــة AMS-01 ، حيــث أنــها تجربــة اختباريــة و إن نتائجــها ليســت نهائيــة .
- عملية المحاكاة ، حيث أننا استخدمنا النموذج IGRF 10 لوصف الحقل المغناطيسي الأرضي و هو نموذج تقريبي (من الرتبة العاشرة) يفتقد إلى الدقة المطلقة إضافة إلى إهمالنا لتأثير الرياح الشمسيــة على الحقل المغناطيسي الأرضي .

6-3 الخلاصة

يقوم الحقــل المغناطيسي الأرضي بمنع الأشــعة الكونية من بلوغ سطح الأرض حيث يقوم بحني مسارا ا و بالتالي تشتيــتها نحو أماكن أخرى من الفضــاء . تبين الدراسة التحليلية لحركــة الجسيمات المشحونة في الحقل المغناطيسي الأرضي أن هاته الجسيــمات كي تتمكن من بلــوغ سطح الأرض يلزمها حد أدنى من الطاقــة E_C و أن هاته القيــمة تتعلق بمكان دخول الجسيم ، وبدقــة أكثر درجة العرض ، و تتعلق أيضا باتجــاه دخول الجسيــم (الزاوية شرق-غرب) حيث أن الجسيــمات موجبة الشحنــة المتجهة نحو الغرب يلزمها طاقــة اقل من تلك التي تلزم الجسيــمات المتجــهة نحــو الشرق كي تبلغ سطح الأرض.
و عليه فان الدراسة التحليليــة لحركة الجسيــمات المشحونة في الحقل المغناطيسي الأرضي تتنبأ بتغيــر تدفق الأشعة الكونيــة من درجة عرض إلى أخرى و بتناقص التدفــق الابتدائي كما تستطيع تحديد قيمة القطــع المطلق لكنها لا تستطيع أن تبين ما هو الشكل النهائي لمنحنى التدفق التفاضلي للأشعة الكونيــة عند أي نقطة من سطح الأرض (أي نقطة من نقاط الحقل المغناطيسي) .
و خلافا للطريقة التحليلية تستطيع عملية المحاكاة باستخــدام طريقة مونت-كارلو أن تؤكد ظاهرة القطع المغناطيسي و أن تحدد من أي قيمة للطاقــة يبدأ منحنى التدفق التفاضلي بالتأثر بظاهرة القطع وعنــد أي قيمة ينعدم تماما . كما تستطيع رسم منحنى التدفــق التفاضلي في أي منطقة من سطح الأرض (أي منطقة من الحقل المغناطيسي) .
و بمقارنة النتائج المتحصل عليها من عملية المحاكاة مع تلك التي قدمتها التجربة AMS-01 نجد أ ما :

- يتفقان على أن عمليــة القطع المغناطيسي لا تمس الجسيــمات عاليــة الطاقــــة ($R > 16$ GV) .
- و أن القيــــمة التي تبــــدأ عنــــدها عمليــــــة القطــــع تتــــعلق بدرجــــة العــرض .
- و أن عملية القطع تكــون اكبر مايمكن في المنطقــة الاستوائيــة وتكون اقل مايمكن عنــد القطبين .
- كما يتفقــان أيــضا مــع تنبــؤات الدراســة التحليليــة فيــما يــخص قيــمة القطــع المطلــق.

أما الاختــلاف الوحيــد الذي يمكن ملاحظتــه بينهما هو في الفرق البسيــط في قيــمة القطع المطلق .

- يمكننا أيضا أن نستخلص بان التدفق التفاضلي الأصلي للأشعة الكونية الابتدائية (قبل دخولها الحقل المغناطيسي الأرضي) يعطى بالصيغة (3-2) .

المراجـــع

[1]- **A. Zichichi** *Relativistic astrophysics and cosmology* international school of cosmic ray -astrophysics- 13th course series Erice , 2002 .

[2]- **Peter K.F Grieder** *Cosmic ray at earth* , Elsevier , 2001 .

[3]- **M.P. De Pascale et al.** J.Geophysics. Res.**98**, 3501 (1993) .

[4]- **J.Karmer et al.** Phys. Rev. Lett. **83**, 4241 (1991).

[5]- **L3+C Collaboration (P. Archard ed al).** Phys.Lett.B598,15(2004) .

[6]- **R.Bellotti et al.** Phys.Rev.D **53**, 35 (1996)

[7]- **S.Coutu.** Phys .Rev.D **62**, 032001 (2000).

[8]- **S.Hayakawa ,** *Cosmic ray physics* , wiley , interscience , 1969 .

[9]- **P.R.Daniel and S.A.Stephens.** Geophysics & Space physics Sci. **12**, 233 (1974) .

[10]- **K.P.Beurmann and G.Wibberenz.** Can.J.Phys.46,S1034 (1968) .

[11]- **I.S.Diggory et al.** J.Phys.A **7.741** (1974).

[12]- **Otto Claus allkofer ,** *Introduction to cosmic radiation* , Verlag karl thiemig- Munchen m 1975 .

[13]- **Bogden Povh , et al** *particles and nuclei* , Springer , 2006 .

[14]- **J. Trampetic , J.Wess.** *particle physics and the univers* , Springer , 2004 .

[15]- **Claus Grupen ,** *astroparticle physics* , Springer , 2005 .

[16]- **G. Battistoni, A.F. Grillo** *introduction to high energy cosmic ray physics*. grillo@vaxgs.lngs.infn.it .

[17]- **Corentin LE GALL** *simulation de gerbes atmospheriques de l'acquisitions des stations locales pour l'experience Pierre Auger* .
.

[18]- **J Wesson ,** tokamakas , clarendon-Oxford , 2004 .

[19]- **E Fermi ,** *Nuclear physics*. the university of Chicago press , 1950 .

[20]- **B Berche ,** *relativité*. www.Lpm.u-nanacy.fr/webperso/berche.b/0-REL_tot.ps .

[21]- **Eric Delhes et al ,** *Géomagnétisme et dynamique des particules chargée* , Université de liège , 2000 .

[22]- **Richard Bronson, Gabriel B. Costa ,** *Differential equation*. McGraw-Hill,2007 .

[23]- **Ronald T.Merriel et al ,** *the magnetic field of the earth*, academic press , 1996 .

[24]- www.elsevier.com/locate/physrep . (physics reports **366** (2000) 331-405) .

[25]- **llya M. sobol'** *a priemer in monte-carllo methode*. CRC Press , 1993 .

[26]- **Jean-pierre Nougier** *méthode de calcul numérique*. Hermes science ,2001 .

Résumé :

Les rayons cosmique sont des particules électriquement chargées à haute énergie, se propageant dans l'espace avec des vitesse très proches de la vitesse de la lumière c. sont d'origine extrasolaire , constituer essentiellement de protons (≈90%), en plus des noyaux de tous les éléments chimiques .
Les rayons cosmiques bombardent l'atmosphère terrestre avec un flux isotrope . Quant on se rapproche de la Terre à une distance inférieure à 10 rayons terrestre, le champs magnétique terrestre devient prédominons devant les champs solaire et galactique . celui-ci joue le rôle d'un bouclier magnétique et rejettent les particule de faible énergie ; ce phénomène s'appeler la coupure géomagnétique . Ceci a pour résultat une diminution du flux des rayons cosmique d'énergie faible (≤ 10 GeV) .
Dans ce travail nous essayons d'expliquer l'effet du champs géomagnétique sur le flux des particules cosmique dans la gamme d'énergie inférieure à 200 GeV, utilisant la méthode Monte Carlo pour simuler la propagation des rayons cosmique dans le champ géomagnétique Nous consédérer seulement la contribution interne de ce champs qui est bien décrite par le modèle internationale des champs de référence (IGRF 10). Nous avons aussi résolu l'équation du mouvement numériquement avec la méthode Runge-Kutta d'ordre quatre.
En fin, nous avons comparé les résultats obtenus avec ceux de l'expérience AMS-01 réalisée en 1998 à environ 380 km d'altitude .

Mots clés : rayons cosmique , géomagnétisme , Stormer, le modèle IGRF(10) , Monte Carlo .

Abstract :

Cosmic rays are mostly high energy charged particle ,originating from outside the solar system, striks the earth from all directions. they are essentially protons (≈90%) but also include heavier nuclei and to a less extent high energy electrons . in their traveling towards the earth they are affected by interstellar magnetic field , spetially the geomagnetic field they must penetrate to reach the top of atmosphere . this field is strong enough to deflect low energy charged particle, which results in a low energy falloff in the flux of the primary cosmic rays observed in the vicinity of the earth , known as *geomagnetic cut off* .

In this work we try to interpret the effect of geomagnetic field on the flux of low proton energy range , using Monte-Carlo simulation and considering only the contribution to geomagnetic field of the internal source well described by the International geomagnetic field reference (IGRF 10) which is an empirical representation based on a truncated multipole expansion corresponding to year 2000 . we also using the back-tracking methods and the fourth ordre runge-kutta methode to integrate equation motion.

At the end we compare our results by these obtained by the space experiment AMS-01, wich investigate cosmic rays during ten days at about 380 km altitude in 1998.

Key words : cosmic rays , geomagnetic , stormer , IGRF(10) model , Monte Carlo

ملخـص :

إن فهم انتشار (propagation) الأشعة الكونية (cosmic ray) في الحقل المغناطيسي الأرضي يسمح بفهم طريقـة انتشارها في الحقول المغناطيسية البين-نجمية (inter-stelar) وهو ما يسمح بتحديد مصادر هاتـه الأشعـة وكيفية اكتسابها تلك المقادير الهائلة من الطاقة التي ترد بها إلينا ، كما يسمح أيضا بشرح العديد من الظواهر المتعلقة بالنيوترينو (neutrino) . إن أهمية دراسة انتشارالاشعة الكونيـة في الحقل المغناطيسي الأرضي تكمن أيضا في إمكانية التأكد من النتائج المتحصل عليها وذلك من خلال مقارنتها بنتائج الأعمال التجريبية التي تنجز باستمرار لمعرفة خصائص الأشعـة الكونيـة .

هذا العمل يهدف إلى شرح عملية انتشار الأشعة الكونية في الحقل المغناطيسي الأرضي عن طريق حساب التغير في مقدار تدفق (flux) هاته الأشعة نتيجة عملية القطع (magnetic cut-off) المغناطيسي التي يحدثها هذا الحقل ضـد جسيمات هاته الأشعـة .

و قد استخدمنا في هذا العمل طريقة مونت-كارلو من اجل محاكاة (simulation) عمليـة الانتشار، وهي الطريقة التي تم ابتداعها أصلا لمعالجة المسائل ذات الطابع الإحصائي و التي تتضمن متغيرات عشوائية ،كما استخدمنـا النموذج العددي المسمى IGRF10 للفترة 2000 لوصف الحقـل المغناطيسي الأرضي إضافة إلى استخدام طريقـة رونج-كيتا (runge-kutta) لحل معادلة الحركة . و من اجل التأكد من مدى صحة النتائج المتحصل عليها قمنا بمقارنتها بتلك التي قدمتها التجربة الاختباريـة AMS-01 ، و هي من احدث النتائـج المتعلقة بقياس تدفق الأشعة الكونية بالقرب من الأرض .

الكلمات المفتاحية :

الأشعة الكونية (cosmic rays) ،الحقل المغناطيسي الأرضي ، ستورمر (Stormer) ، النموذج IGRF10 (IGRF 10 model) ، مونت-كارلو (Monte Carlo) .